

## 高浜撓曲周辺における浅部反射法地震探査 Shallow seismic reflection surveys around the Takahama Flexure

伊藤 忍<sup>1\*</sup>・木下佐和子<sup>1</sup>・山口和雄<sup>1</sup>

Shinobu Ito<sup>1</sup>, Sawako Kinoshita<sup>1</sup> and Kazuo Yamaguchi<sup>1</sup>

**Abstract:** We had obtained seismic records to applicate seismic interferometry at around the Takahama River in Hekinan, Aichi on January, 2018 (Kinoshita *et al.*, 2018). We also had conducted P-wave seismic reflection survey to reveal the subsurface structure of the Takahama Flexure at around the Aburagafuchi in Hekinan. Based on these surveys, we conducted S-wave seismic reflection survey at around the Aburagafuchi, and 3-component seismic reflection survey at around the Takahama River as additional surveys. Reflected S-wave can be seen in the shot records for the Aburagafuchi survey line. On the other hand, obvious S-wave cannot be seen in the shot records for the Takahama River survey line. However, P-wave, surface wave, and other unknown events can be seen in the shot records. We expect to obtain detailed structure with data recorded by Kinoshita *et al.* (2018).

**Keywords:** seismic reflection survey, Takahama Flexure, Mikawa Earthquake

### 要 旨

2018年1月に、愛知県碧南市の高浜川周辺において、地震波干渉法の適用実験のためのデータを取得した(木下ほか, 2018)。また、2018年3月に、愛知県碧南市の油ヶ淵周辺において、高浜撓曲の構造を明らかにするためにP波反射法地震探査を実施した。これらの実験の補完調査として、油ヶ淵周辺においてS波反射法地震探査を実施し、高浜川周辺において3成分反射法地震探査を実施した。油ヶ淵測線においては、発震記録にS波の反射波と推定されるイベントが見られた。一方、高浜川測線の発震記録には、明瞭なS波の反射波は認められなかったが、P波や表面波、その他に起源の明らかでないイベントが見られた。木下ほか(2018)で収録したデータとあわせて処理を進めることにより、詳細な構造を明らかにすることが期待される。

### 1. はじめに

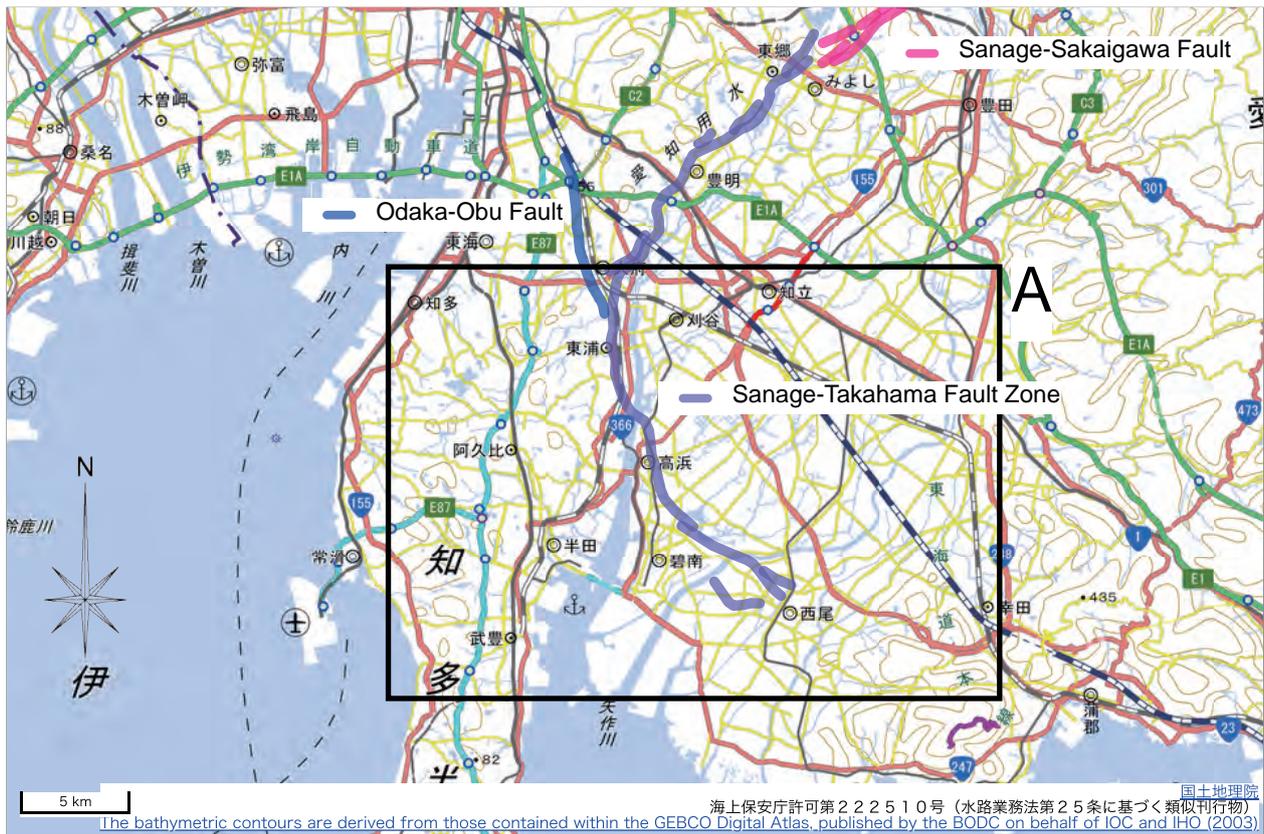
高浜撓曲は、愛知県三河地域の西部に位置する撓曲であり、地震調査研究推進本部地震調査委員会(2004)によれば<sup>さなげ</sup>猿投-高浜断層帯の一部であるとされている(第1図)。一方、飯田・坂部(1972)は、三河地震の地表断層であると言われる<sup>ふこうず</sup>深溝断層が、現在横須賀断層と呼ばれている北西に延長されることを示した。さらに、愛知県土木部による水準測量の結果から、<sup>おおだか</sup>大高一<sup>おおぶ</sup>大府構造線の南方延長部が<sup>へきかい</sup>碧海台地において変位を

生じており、地震断層が潜在していると述べているが、これは高浜撓曲を指している。飯田・坂部(1972)は、三河地震にともなう一連の活動帯が、濃尾地震断層帯と関係していると結論づけている。しかしながら、地震調査研究推進本部地震調査委員会(2004)は、これらを一連の断層帯としては取り扱っていない。その主たる理由は、三河地震の断層帯は一樣に東落ちであるのに対して、これと濃尾地震断層帯との間に位置する名古屋付近の堀川断層や笠寺起震断層は西落ちを示すためである。また、地震調査研究推進本部地震調査委員会(2004)は、猿投-高浜断層帯を長期評価の対象とする一方、深溝断層と横須賀断層については長期評価の対象としていない。これは、深溝断層と横須賀断層の最新活動が1945年の三河地震であり、現在は活動度が低いことによるものである。一方で、高浜撓曲を含む猿投-高浜断層帯の最新活動が約1万4千年前頃としており、三河地震による活動を認めていない。

ところで、浜田(1987)は、三河地震の余震が北西-南東方向に分布することを示し、本震の初動の押し引き分布も概ね説明できることから、震源断層は北西-南東の走向をもつ左横ずれ断層であるとした。また、Kikuchi *et al.* (2003)は地震波形インバージョンを行っているが、浜田(1987)が提案した断層面を採用すると解が良く収束するとして、この断層面を採用している。一方で、杉戸・岡田(2004)は、北西-南東の走向をもつ断層面が、三河地震による地表地震断層である深溝断層及び横須賀断層と不調和であると述べてい

\*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 猿投—高浜断層帯の概略位置図。活断層データベースによる。基図は国土地理院タイルを使用している。図中の矩形 A で示した部分が第 2 図の範囲である。

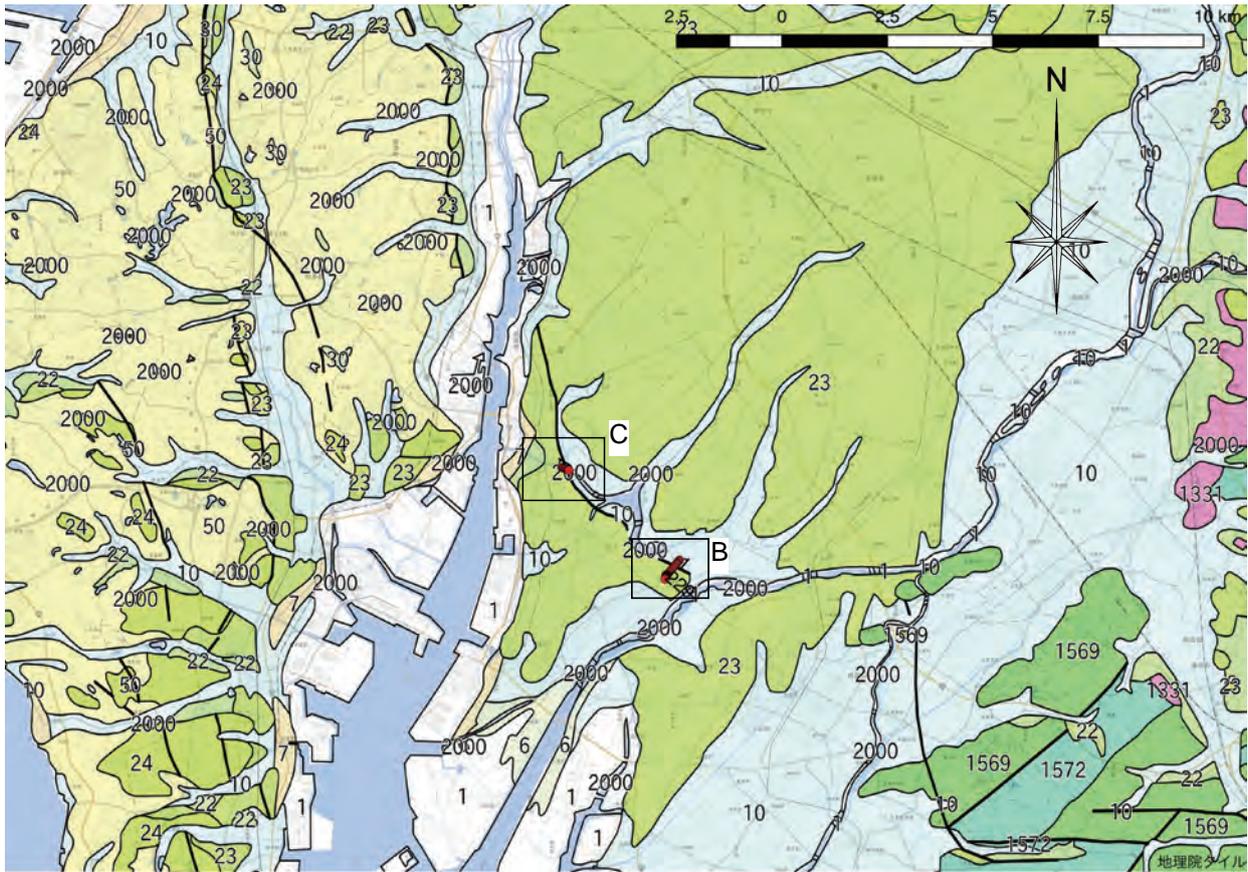
Fig. 1 Location map of the Sanage – Takahama Fault Zone. It is referred from Active fault database of Japan. Base map is provided by the Geospatial Information Authority of Japan. A rectangle in “A” indicates the area corresponding to the Fig. 2.

る。地震調査研究推進本部地震調査委員会（2004）は、猿投—高浜断層帯の屈曲点以南、すなわち高浜撓曲の走向を  $N25^{\circ}W$  としている。これを見る限り、高浜撓曲も三河地震による地表地震断層とされている深溝断層や横須賀断層とは切り離して考えることが妥当であるようにも見える。しかしながら、高浜撓曲の走向と、浜田（1987）による三河地震の余震分布、本震の初動の押し引き分布は調和的であり、Kikuchi *et al.*（2003）による本震の破壊過程もよく説明できることに留意すべきであろう。三河地震を理解するのに、一部の例外を除いて高浜撓曲はほとんど注目されてこなかったが、よく検討する必要があると考えられる。

高浜撓曲における反射法地震探査は愛知県（1996）によるものがあり、高浜撓曲のうち比較的北東部にあたる E 測線で実施されている。この報告書の中では、高浜撓曲崖と大高一府断層との連続性については注意が払われており、平均変位速度や両断層の西側の地質の一致を根拠に、両者が一連の断層である可能性が高いと結論づけている。一方、三河地震との関連については既存調査についてまとめた中に言及があるのみである。高浜撓曲の南東部では、木下ほか（2018）が

各種弾性波探査を実施している。まず、愛知県碧南市の油ヶ淵周辺で P 波反射法探査を実施しているが、この付近の高浜撓曲は、中田・今泉（2002）によれば位置が不明確とされており、その他の文献でも位置は一致しておらず、これを明確にするのが主目的であった。次に、愛知県碧南市の油ヶ淵周辺で VSP 探査を実施しているが、これはボーリングデータを利用するとともに、逆にボーリングデータの解釈に資するための調査であって、これが直ちに高浜撓曲の理解につながるものではない。さらに、愛知県碧南市の高浜川周辺において地震波干渉法の探査を実施しているが、この付近は中田・今泉（2002）によれば明確に活断層の位置が示されており、手法適用の実証実験の意味合いが大きい。

木下ほか（2018）の処理が進んだ際に、さらなるデータ取得が要求されることは想像に難くない。油ヶ淵周辺で実施した P 波探査については、より高分解能な結果を得るために S 波探査のデータが要求されるであろう。高浜川周辺で実施した地震波干渉法の探査については、アクティブな震源を用いた結果が要求され、特に地震波干渉法との比較を考慮するなら P 波及び S 波



第2図 調査位置図。基図はシームレス地質図による。背景地図は国土地理院タイルを使用している。図中の矩形B及びCで示した部分がそれぞれ第3図及び第4図の範囲である。

Fig. 2 Location map of Survey lines. Base map is referred from the Seamless Geological Map. Back ground map is provided by the Geospatial Information Authority of Japan. Two rectangles in “B” and “C” indicate the areas corresponding to the Fig. 3 and Fig. 4, respectively.

を用いて、受振には3成分のデータを記録することが求められるであろう。これらのことを念頭において、木下ほか(2018)と重複する測線でS波反射法地震探査及び3成分反射法地震探査を実施した(第2図)。

## 2. 反射法地震探査の詳細

調査は2019年2月12日から17日までの6日間で行った。調査の諸元を第1表に示す。前半に油ヶ淵周辺での調査(GS-HAB1)を実施し、後半に高浜川周辺の調査(GS-HTK1)を実施した。両者の受振システムの仕様は大きく異なるので後述する。

発震は、地球科学総合研究所が所有する小型インパクトのJMS-Mini65-2を使用した。JMS-Mini65-2の総重量は2.2 t、打撃エネルギーは2,000 Jである。JMS-Mini65-2は、シリンダ軸を進行方向右側に最大60度傾けることが可能で、これによりS波を発震することができる。

測点測量は、VRS方式のネットワーク型RTK法で受

振器の位置を測定した。概ね10点おきに測定し、それ以外の点については内挿することとした。内挿が不適切と思われる著しく屈曲した部分に関しては細かく測定した。また、発震位置については、発震作業の際に受振器からのオフセットを計測して記録した。

### 2.1 油ヶ淵周辺におけるS波反射法地震探査(油ヶ淵測線・GS-HAB1)

調査は2019年2月12日から15日までの4日間で行った。調査地は愛知県碧南市縄手町から鷲塚町に至る、ほぼ北東-南西方向の道路上である(第3図、GS-HAB1)。北東側に位置する縄手町はほぼ田畑で、傾斜はほとんどないが、中田・今泉(2002)をはじめとする多くの文献は、この田畑に位置が不明確な断層の地表トレースを配置している。一方、南西側に位置する鷲塚町はほぼ碧海台地上にあり、住宅地となっている。鷲塚町は縄手町に対して数メートル程度標高が高い。

測点間隔は2 m、総測点数は306点、従って測線長はおおよそ610 mである。受振器は基本的にGeospace社製

第1表 探査の諸元.  
Table 1 Specification of the survey.

	GS-HAB1	GS-HTK1
Period	Feb. 12 to 15, 2019	Feb. 16, 17, 2019
Line Length	610 m	190 m
Source	JMS-Mini65-2	JMS-Mini65-2
Repeat Number of Shots	5 + 5 (Shear)	5 + 5 (Shear) 5 (Normal)
Number of Shot Points	306	96
Shot Interval	2 m	2 m
Receiver	GS-32CT ( $f_0=10$ Hz)	GS-32CT ( $f_0=10$ Hz) 3-components
Number of Receiver Points	306	96
Receiver Interval	2 m	2 m
Recording System	DSS-12, GSX	DSS-12
Number of Recording Channels	114 - 192	288
Record Duration	2 s	2 s
Sampling Interval	1 ms	1 ms

のGS-32CT（固有周波数10 Hz）を内蔵した水平動シングル受振器96個と、同じエレメントを内蔵した3成分受振器96個を使用した。

データ収録には、縄手町内に該当する受振点1～240については基本的にサンコーコンサルタント社製のテレメトリ型地震探査システムであるDSS-12を使用した（第2表）。鷺塚町の住宅地に該当する受振点241～306についてはケーブルの敷設に手間がかかるため、Geospace社製の独立型地震探査システムであるGSXを使用した。調査の前半は、同時受振点数を192とし、48点ずつ展開を移動した。このパターンでの最終の展開は受振点97～288となる。この次は変則的に24点移動し、遠端側は測点の終点である306とし、121～306の186点の展開とした。最後は近端側の受振器を回収し、193～306の114点の展開とした。サンプリング間隔は1 ms、記録長は2秒とした。

発震は、測線に対して直交する2方向からそれぞれ5回ずつ、あわせて10回の発震を基本とした。各展開の近端側の48点での発震を基本としたが、発震点121～192は受振点121～306の展開、発震点193～306は受振点193～306の展開とした（第2表）。なお、発震・受振点の236～251の区間については、測線の方向が測線全体の方向と斜交するため、発震・受振ともに測線全体の方向となるように設置・発震した。

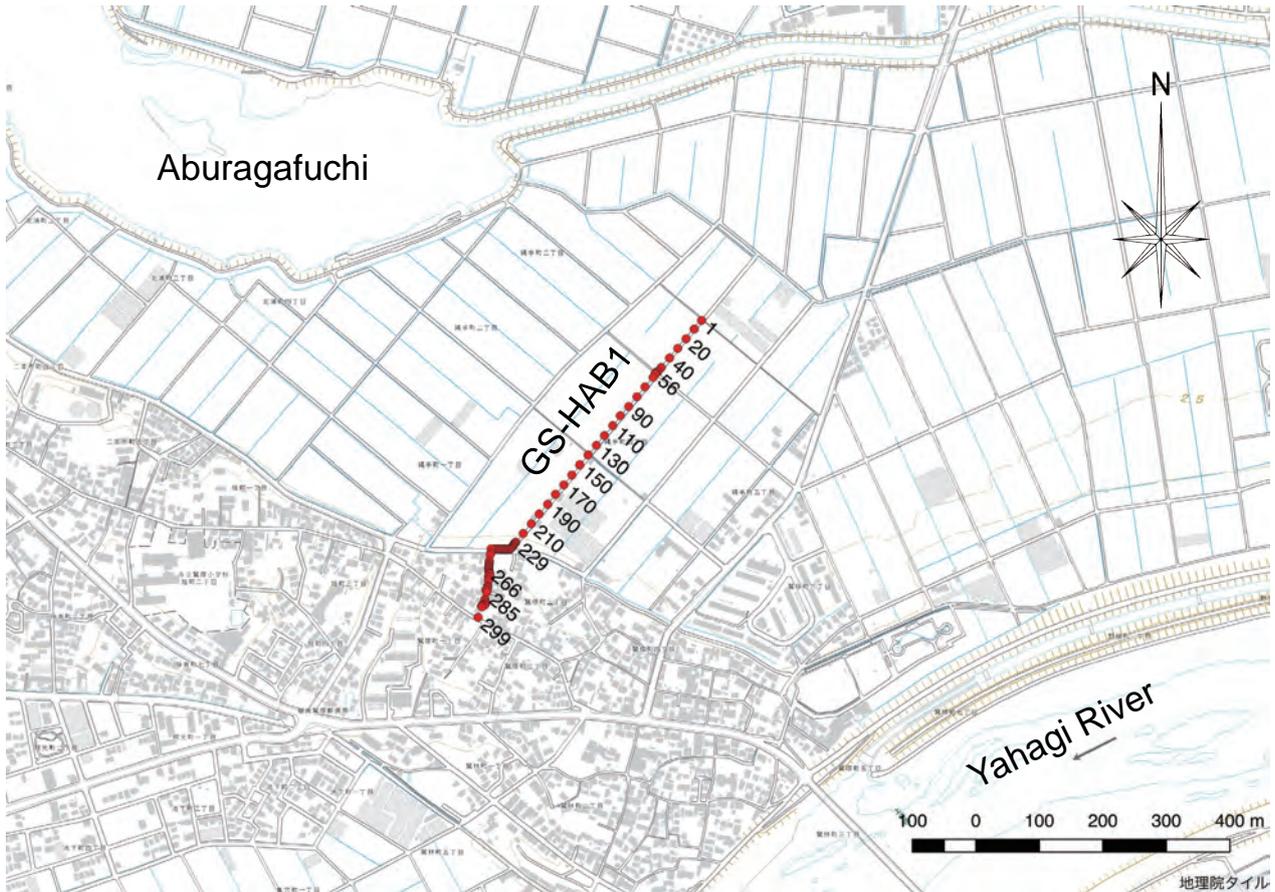
## 2.2 高浜川周辺における3成分反射法地震探査（高浜川測線・GS-HTK1）

調査は2019年2月16日と17日の2日間で実施した。調査地は愛知県碧南市丸山町の、高浜川左岸堤防上であり、測線の方向は概ね西北西－東北東である（第4図、GS-HTK1）。

測点間隔は2 m、総測点数は96点、従って測線長はおよそ190 mで固定展開とした。受振器はGS-32CT内蔵の3成分受振器96個を使用し、総チャンネル数は288とした。データ収録はテレメトリ型システムであるDSS-12を使用した。発震は、測線に対して直交する2方向からそれぞれ5回ずつ発震し、さらにシリンダを傾けず真上から5回発震した。

## 3. 取得データ

第5図に油ヶ淵測線（GS-HAB1）における発震記録例とその重合記録例を示す。SHOT ID 9からSHOT ID 13までは、いずれも発震点1における発震に対する原記録であり、測線の進行方向に対して右側から打撃を加えたものである。測線上には送電線が通っており、いずれの発震記録にも特徴的な60 Hzのノイズが認められる。そこで、60 Hz付近のバンドストップフィルタをかけて垂直重合（ダイバーシティスタック）したものが“ONE SIDE STACK”で示した発震記録である。60 Hzの特徴的なノイズはほとんど見えなくなっている。



第3図 油ヶ淵測線（GS-HAB1）周辺の詳細図。基図は国土地理院タイルを使用している。受振点のうち、GNSS 測量で測定した点を赤丸で示した。

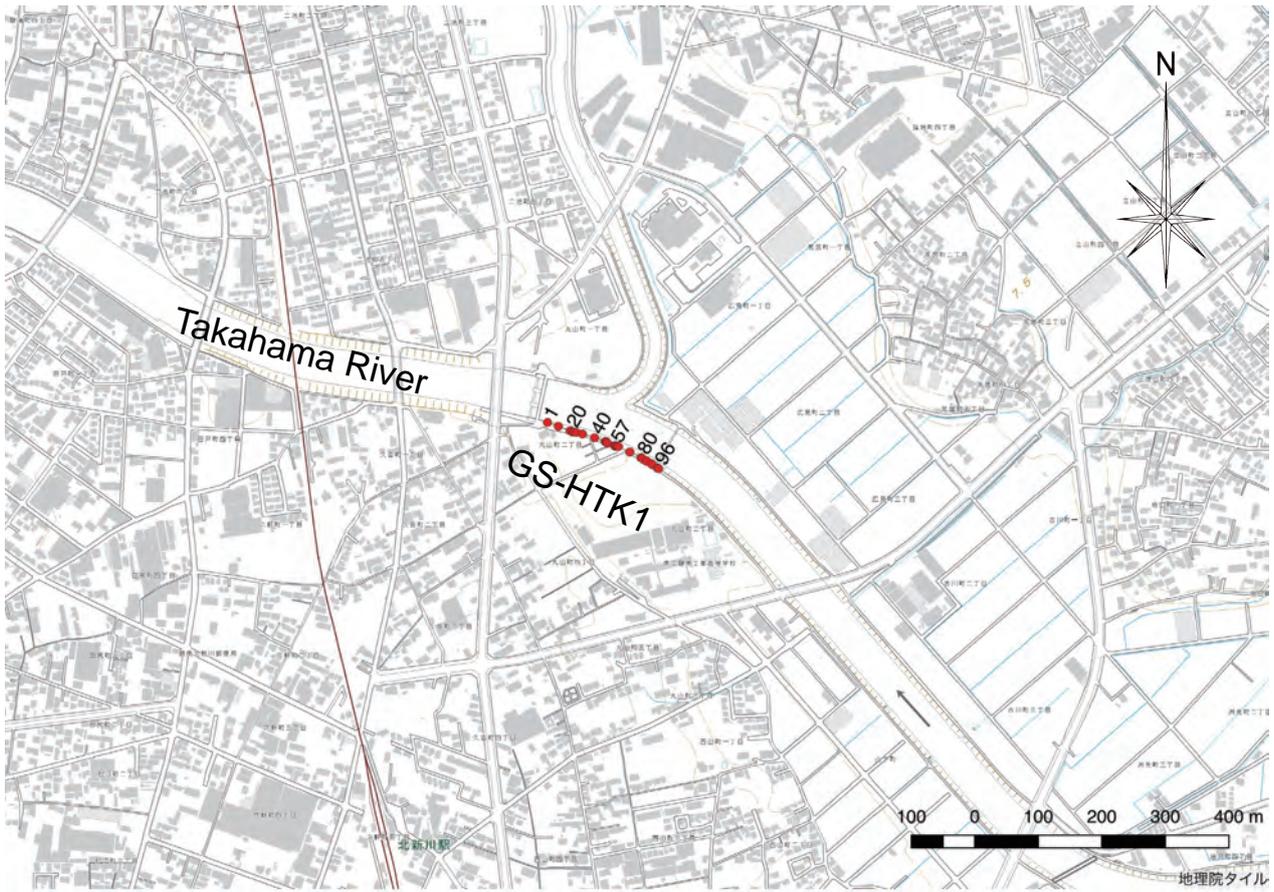
Fig. 3 Detailed map around the GS-HAB1 survey line. Base map is provided by the Geospatial Information Authority of Japan. Red circles are receiver points of which positions are surveyed by GNSS.

第2表 GS-HAB1 の受振器展開概要。  
Table 2 Outline of receiver deployment for GS-HAB1.

Shot Points	DSS-12 Receiver Points	GSX Receiver Points	Number of Receivers
1 - 48	1 - 192		192
49 - 96	49 - 240		192
97 - 120	97 - 240	241 - 288	192
121 - 192	121 - 240	241 - 306	186
193 - 306	193 - 240	241 - 306	114

初動と認識される相の見かけ速度は緩やかに変化しているが、明らかに 400 m/s 以下であり、S 波あるいは表面波によるものと推定される。逆に、明らかに P 波に起源をもつと考えられるような相は認められない。測線の進行方向に対して左側から打撃を加えた発震記録との差を取ったものが“BOTH SIDE STACK”である。

差を取る前の“ONE SIDE STACK”においても P 波起源の相が認められないため、差を取ることによる明瞭な効果は、この発震点 1 では認められない。しかしながら、全点において同様であるとは限らないため、調査を通じて両方向からの打撃による発震記録を収録している。表面波が卓越して見づらいが、S 波の反射波と考



第4図 高浜川測線 (GS-HTK1) 周辺の詳細図。基図は国土地理院タイルを使用している。受振点のうち、GNSS 測量で測定した点を赤丸で示した。

Fig. 4 Detailed map around the GS-HTK1 survey line. Base map is provided by the Geospatial Information Authority of Japan. Red circles are receiver points of which positions are surveyed by GNSS.

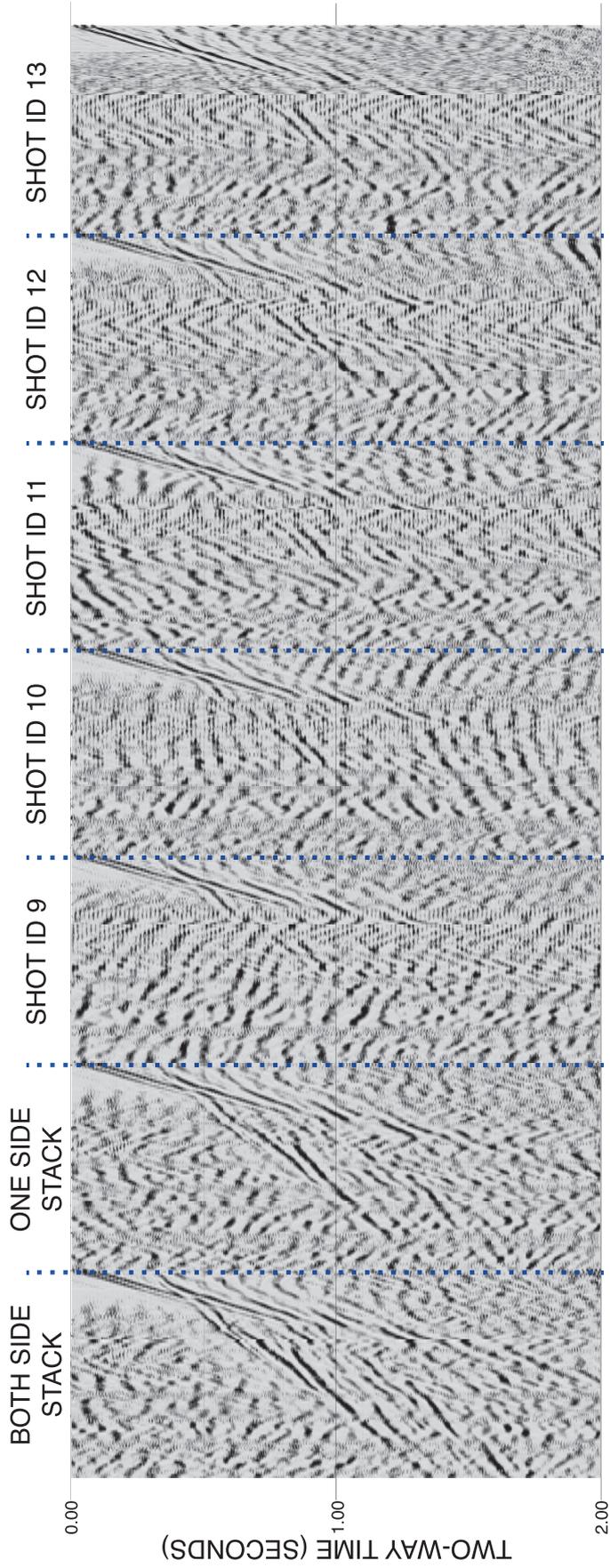
られるイベントも認められるようである。

第6図に高浜川測線 (GS-HTK1) における記録例を示す。いずれも発震点1における発震に対する、全96受振点の重合記録であり、表示に際しAGC及び10 Hz ~ 180 Hzのバンドパスフィルタを施している。Aは地面に対して鉛直方向から発震したものの上下動記録(V)であり、通常のP波探査の記録である。Bは上下動記録であるが、測線に対して直交する2方向からの記録の和を取ったもので、SH波はキャンセルされ、P波が強調されることが期待される。実際に、Aと比較して若干ノイズが大きいようにも見えるが、ほとんど遜色がないようである。Cは、鉛直方向から発震したものに対する、測線に沿った方向の水平動記録(H1)であり、Rayleigh波やP-SV変換波が記録されることが期待される。表面波は、AやBに見られる表面波と比較して特に顕著ではないようである。しかしながら、遠端には見かけ速度の大きい後続派が見られる。S波よりも後に続くため、P-SV変換波とは考えられない。走時からはS波の反射波か、S-P変換波等が考えられるが、な

ぜこの成分で顕著に見られるのか不明であり、検討の必要がある。Dは、鉛直方向からの発震に対する、測線に直交する方向の水平動記録(H2)である。Cで見られたような顕著な後続派は見られない。逆に、Cと比較して、振幅は小さいもののP波が認められる。Eは、測線に対して直交する2方向からの記録の差を取ったものに対するH2であり、通常のS波探査の記録である。P波はキャンセルされ、SH波が強調されることが期待されるが、実際にS波が顕著である。ただ、この発震記録を見る限りでは顕著な反射波は認められず、S波の反射法処理には困難がともなうことが予想される。

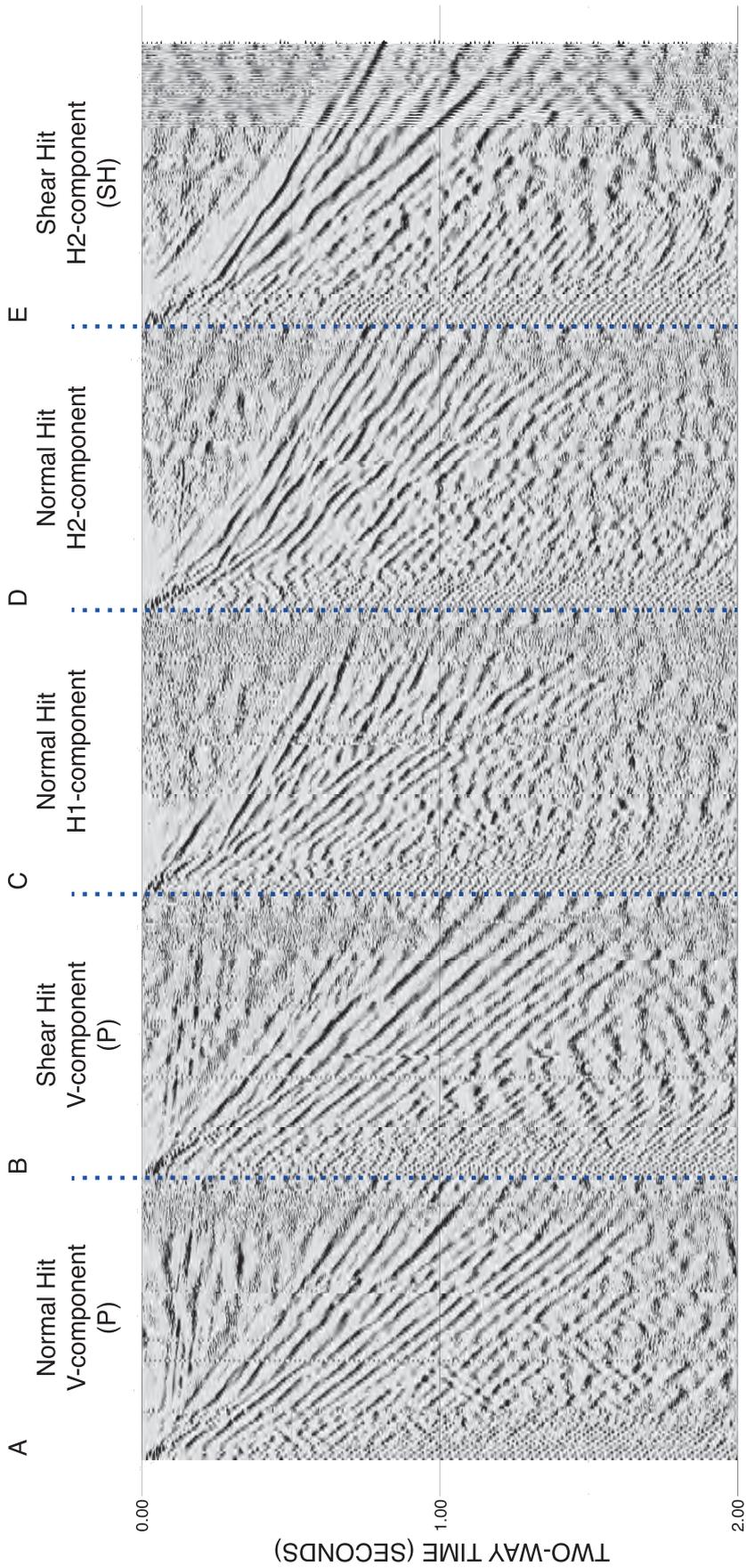
#### まとめ

高浜撓曲の詳細な構造を明らかにするために、愛知県碧南市において反射法地震探査を実施した。油ヶ淵周辺(GS-HAB1)においてはS波探査を、高浜川周辺(GS-HTK1)においては3成分探査をそれぞれ実施した。GS-HAB1においては、発震記録中にS波の反射波が認



第 5 図 油ヶ淵測線 (GS-HAB1) の、振幅調整して表示した発震記録例。SHOT ID 9 から 13 までは原記録である。ONE SIDE STACK は片側から打撃した発震記録を重合したものである。BOTH SIDE STACK は、両側から打撃した重合発震記録をそれぞれ作成し、その差をとったものである。

Fig. 5 Examples of shot records with AGC at the GS-HAB1 survey line. SHOT ID 9 to 13 are original records. "ONE SIDE STACK" shows the vertical stacked record by hitting only one direction. "BOTH SIDE STACK" shows the differences between one and the opposite direction hitting records.



第 6 図 高浜川測線 (GS-HTK1) の、振幅調整して表示した発震記録例。A は地面に鉛直方向から打撃したものの上下動成分の記録である。B は斜めに打撃した記録から合成した上下動成分の記録である。C は鉛直方向から打撃したものの H1 成分である。D は鉛直方向から打撃したものの H2 成分である。E は斜めに打撃した記録から合成した H2 成分の記録である。

Fig. 6 Examples of shot records with AGC at the GS-HTK1 survey line. A is the vertical component record for the normal hit. B is the composite vertical component record from the shear hit. C is the horizontal component record along the survey line, for the normal hit. D is the horizontal component record cross the survey line, for the normal hit. E is the horizontal component record cross the survey line, for the shear hit.

められるようである。GS-HTK1においては、発震記録だけからは明瞭なS波の反射波は認められなかった。しかしながら、P波や表面波、その他に起源のはっきりしないイベントが認められた。木下ほか(2018)で収録したデータとあわせて処理を進めることにより、詳細な構造を明らかにすることが期待される。

**謝辞：**碧南市経済環境部農業水産課及び建設部土木港湾課、愛知県知立建設事務所には、調査に際して多大なご協力と有益な助言をいただいた。また、調査機材の一時保管については、愛知県知立建設事務所、公営財団法人都市整備協会油ヶ淵水辺公園管理事務所、碧南市経済環境部農業水産課にご協力を頂いた。記して感謝の意を表す。

## 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, 311p.
- 浜田信生(1987)日本列島の内陸部に発生した被害地震に伴う地震活動の再調査とその地震学的意義. 気象研究所報告, **38**, 77-156.
- 飯田汲事・坂部和夫(1972)三河地震における深溝断層の延長部について. 地震第2輯, **25**, 44-55.
- 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\\_byoubu/](https://www.jishin.go.jp/main/chousa/04oct_byoubu/) (確認日 2019年4月12日)
- Kikuchi, M., M. Nakamura, and K. Yoshikawa (2003) Source rupture processes of the 1944 Tonankai earthquake and the 1945 Mikawa earthquake derived from low-gain seismograms, *Earth Planets Space*, **55**, 159-172.
- 木下佐和子・山口和雄・伊藤 忍(2018)高浜断層周辺における浅部地下構造調査の実施. 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, 59-71.
- 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.
- 杉戸信彦・岡田篤正(2004)1945年三河地震の地表地震断層. 活断層研究, **24**, 103-127.