

兵庫県南あわじ市における浅部地下構造調査の概要 Shallow structure surveys at Minami-Awaji City in Hyogo Prefecture

木下佐和子^{1*}・伊藤 忍¹
KINOSHITA Sawako^{1*} and ITO Shinobu¹

Abstract: We conducted S and P wave shallow seismic reflection surveys, a surface wave survey, microtremor surveys at two lines, and seismic cone penetration surveys at two sites in Minami-Awaji City, Hyogo Prefecture, to clarify the spatial distribution and the amount of the activity of the Minato-Honjo Fault. We obtained high quality data from those surveys, and we will conduct further analyses to gain more insight into the geological information around the Minato-Honjo Fault area.

Keywords: seismic reflection survey, Minato-Honjo Fault

要 旨

我々は、湊－本庄断層の位置・断層による地下の変形構造などを明らかにすることを旨とし、兵庫県南あわじ市において2つの測線でS波・P波反射法探査、表面波探査、微動観測を実施し、2ヶ所の私有地でサイスミックコーン貫入試験を実施した。どの調査でも良好なデータが得られたので、今後データ処理をすすめ、湊－本庄断層周辺地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、令和2年度から紀伊水道沿岸域を対象に様々な調査を実施している。本報告では、紀伊水道沿岸陸域調査の一環として、令和4年度に兵庫県南あわじ市において湊－本庄断層周辺地域で実施した浅部地下構造調査（反射法地震探査・表面波探査・微動観測・サイスミックコーン貫入試験）のデータ取得状況に関してまとめる。

2. 調査地域周辺の概要

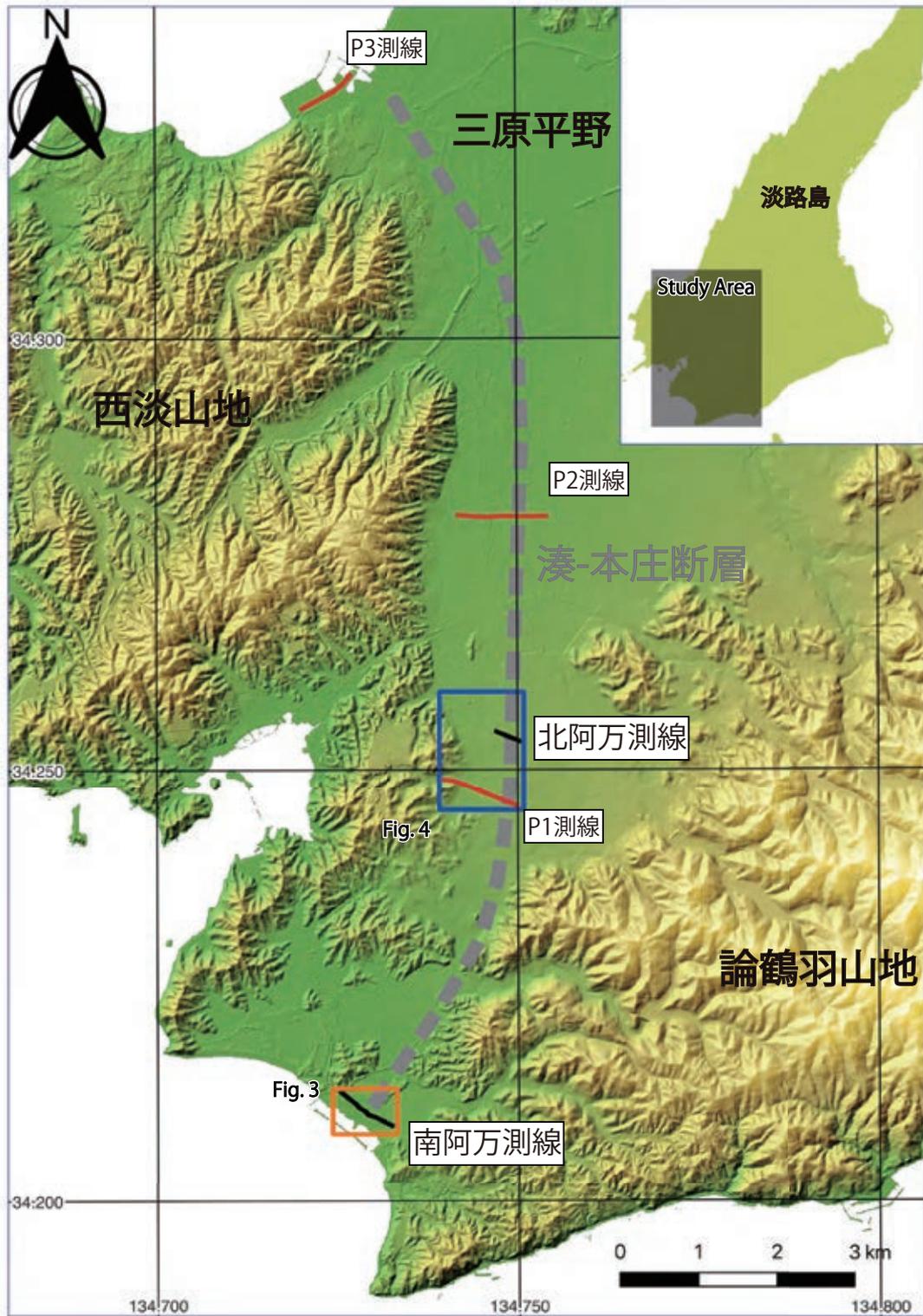
淡路島南部は主に和泉層群から形成される論鶴羽山地が東西に、西淡山地が南北に走り、その間に三原平野などの低地帯が分布している（兵庫県, 1982など, 第1図）。西淡山地は、東西約6 km, 南北約10 kmにわたって分布し、最高で標高約270 mの低く平らな小山が集合している山地である（兵庫県, 1982）。西淡山地の東には沖積低地である三原平野が分布し、西淡山地と三

原平野の境界付近に湊－本庄断層が推定されている（兵庫県, 1982）。湊－本庄断層はほぼ北－南方向に延びる、総延長およそ15 km, 西側隆起の逆断層である（兵庫県1982, 水野・吉岡1996など）。なお、湊－本庄断層の北部では、活断層研究会編（1991）、岡田ほか（2014）などにより西側隆起の飯山寺断層という名称が使用されているが、本報告では兵庫県（1982）、水野・吉岡（1996）などに従って、湊－本庄断層とよぶ。

湊－本庄断層は、断層の北部では撓曲崖を伴う西側隆起の変位地形が認められる（岡田・熊原, 2014）。しかし、断層中部以南においては、変位地形は不明瞭である。水野・吉岡（1996）は、湊－本庄断層分布地域周辺において、複数のボーリング調査、トレンチ調査、反射法地震探査などを実施した。その結果、湊－本庄断層の中央付近において地下の大坂層群の変形構造を認め、西側隆起と東側隆起の断層が存在している可能性を示唆した。しかし、南北で明瞭に連続する活断層の分布は確認されず、湊－本庄断層は小断層が複数分布する複雑な構造をしていることが示唆された。また、湊－本庄断層の推定位置最南部の阿万地区においては、断層推定位置の西側で反射法地震探査が実施されたため、断層位置は確定できていない。さらに、湊－本庄断層の中央部において、断層推定位置周辺の沖積低地・低位段丘構成層が分布する地域には、和泉層群の孤立丘が複数分布しており、和泉層群の分布に関しても不明な点が残されている。

中谷ほか（2022）は、阿万地区において、湊－本庄断層の推定位置をはさむように2本のボーリングコアを掘削した。その結果、断層推定位置の東側では深度約47 m～7 mまで大坂層群を認め、また断層推定位置の西側では深度約25 mより下位に和泉層群を認め、そ

*Corresponding author: KINOSHITA, S., Central 7, 1-1-1 Higashi, Tsukuba, Ibaraki 305-8567, Japan. E-mail: sawako.kinoshita@aist.go.jp.
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 本調査対象地域周辺の地図と調査地点の位置図。

黒実線は本調査の測線を表す。灰色破線は牧本ほか(1995)による湊-本庄断層の推定位置を表す。赤色実線は水野・吉岡(1996)の P 波反射法地震探査の位置を示す。橙色四角, 青色四角で囲まれた領域は第 3 図, 第 4 図の範囲を示す。基図に国土地理院発行の基盤地図情報 (数値標高モデル 5 m メッシュ) を使用した。

Fig. 1 Map of the study area and the location of survey lines, points.

The black solid lines represent the survey lines in this survey. The gray dashed line represents the location of the Minato-Honjo Fault from Makimoto *et al.* (1995). The red solid lines are the locations of the P wave reflection surveys from Mizuno and Yoshioka (1996). The orange and blue squares represent the survey regions of Fig. 3 and 4, respectively. The elevation data is obtained from the 5 m-grid digital data provided by the Geospatial Information Authority of Japan (GSI).

れより上位に大阪層群は認めなかった。これまでの結果では、阿万地区において、大阪層群と和泉層群がどのように接するのか、湊-本庄断層の存否は明らかにはなっていない。

3. 調査の目的と実施した調査

本調査は、湊-本庄断層の推定位置南部の阿万地区において、断層の位置、変形構造を明らかにするため、また、湊-本庄断層の推定位置中央部で和泉層群孤立丘が分布する北阿万筒井地区において、地下浅部の構造を明らかにするために、複数の浅部地下構造調査を実施した。具体的には、阿万地区においては、S波・P波反射法地震探査、微動観測、表面波探査、サイスミックコーン貫入試験の5種類の調査を実施し、北阿万筒井地区においては、P波反射法地震探査、微動観測の2種類の調査を実施した。

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ングする手法である（物理探査学会、2016など）。P波反射法地震探査は、受振器はシングル、受振器とケーブルは一体型の簡便なシステムを用いても、条件の良い場合は深度十数から数百m程度という範囲で分解能の高い地下断面図が得られることが実証されている（山口ほか、2019、木下ほか、2023）。また、S波反射法地震探査はP波反射法地震探査と比較して波の伝播速度が小さいため、空間分解能が高い詳細な構造をイメージングすることができる。阿万地区においては、ボーリング調査の結果（中谷ほか、2022）と比較するために、S波・P波反射法地震探査2種類を実施した。北阿万筒井地区においては水野・吉岡（1996）のP波反射法地震探査の結果と比較するためにP波反射法地震探査を実施した。

表面波探査は地表付近を伝わる表面波を人工的に発生させて測定し、波長による伝播速度の違いを逆解析することによって、深度数mから数十mのS波速度構造を求める手法である（物理探査学会、2016など）。阿万地区においては、ボーリング調査（中谷ほか、2022）によると地下約20m付近という非常に浅部に和泉層群、つまりS波速度が大きい地層が存在すると考えられる。S波・P波反射法地震探査の解析を進める際に、地下浅部のS波速度構造は有益な情報となる。また、本調査では3章で述べる通り、P波反射法地震探査に固有周波数2Hzの上下動ジオフォンを使用したため、反射法地震探査と同じ受振器、展開を使用して表面波探査のデータを取得することができる。以上の理由から、阿万地区において、反射法地震探査と同じ測線で表面波

探査を実施した。さらに、P波反射法地震探査、表面波探査が終わった後に展開移動せず、そのまま30分から60分程度データを収録し続けることで、微動データも収録した。微動データの収録には発震などの追加作業は必要としないため、阿万地区、北阿万筒井地区ともにデータ収録した。微動アレイ探査は、地表で複数個の微動計によって同時に微動を観測し、微動に含まれる表面波の位相速度を推定し、その位相速度を逆解析することによって、地下数十mから数百mまでのS波速度構造を求める手法である。今回は反射法地震探査と同じ展開を用いてデータを収録したため、一般的な微動アレイ探査で実施される正三角形アレイや円形アレイデータではなく、直線アレイデータを収録した。同時に受振した受振点のうち、2個ずつペアにして解析することで、2点間のS波速度構造を求めることを想定した。表面波探査同様に、地下浅部のS波速度構造は、反射法地震探査の解析を進める際の有益な情報として使用できることが期待される。

サイスミックコーン貫入試験は、ジオフォンが内蔵されている電気式コーンを地中に貫入し、一定深度ごとに地表でS波を発震して測定・解析することで、地盤中のS波速度を計測する調査である（西田ほか、1999など）。S波反射法地震探査の処理の際、地下浅部のS波速度構造は不均質であるため、時間断面から深度断面に変換するための適切な区間速度モデルを構築することが重要である（稲崎・加野、2020）。稲崎ほか（1989）は直接的にS波速度を求めるために、S波VSPを用いることを提案した。VSP検層はボーリング掘削坑を利用し、地表で発震した地震波を孔内に展開した受振器によって計測し、ボーリング地点周辺の地下構造を調べる手法である（物理探査学会、2016）。稲崎・加野（2020）などでは、ボーリング掘削孔ではなく、サイスミックコーン貫入試験を用いてS波VSPを実施し、S波反射法地震探査の結果と比較している。阿万地域において、水野・吉岡（1996）、中谷ほか（2022）はボーリング掘削孔でPS検層やS波VSPを実施していないため、中谷ほか（2022）のオールコアボーリング調査地点付近で地下浅部のS波速度を求めるためにサイスミックコーン貫入試験を実施した。

4. 調査の詳細

調査は使用する機材・調査場所の関係で、道路上で実施する調査（反射法地震探査・表面波探査・微動観測）と私有地で実施する調査（サイスミックコーン貫入試験）に分け、2023年2月中旬から3月上旬にかけて実施した。以下にそれぞれの探査の詳細を記す。

4.1 反射法地震探査・表面波探査・微動観測

本調査は2023年2月15日から25日までの11日間で実施した。第1表に調査諸元を記す。前半に阿万西町と阿万東町の市道上における調査（南阿万測線，GS-AMS）を実施し，後半に北阿万筒井地区の市道・農道における調査（北阿万測線，GS-AMN）を実施した。第2図に反射法地震探査・表面波探査・微動観測の様子，第3，4図に南阿万測線，北阿万測線の詳細位置を示す。

機材は，愛知県碧南市における反射法探査（木下ほか2023）とほぼ同じものを用いた。反射法地震探査の震源には小型油圧インパクト（JMS-mini65-2，地球科学総合研究所製）を使用した。JMS-mini65-2は，P/S両方で総重量2.2 t，打撃エネルギー2,000 Jの油圧インパクトである。JMS-mini65-2は，シリンダ軸が縦向きの際はP波を発震し，シリンダ軸を進行方向右側に最大60度傾けてS波を発震することが可能である。表面波探査の震源には，長さ約1 mの金属製の掛矢を使用し，道路に直径約30 cm，厚さ約2 cmの丸い金属板を置き，その板の中心を掛矢で打撃して発震した。P波反射法地震探査の発震回数は各点5回を基本とした。S波反射法地震探査の発震回数は測線の進行方向に対して右側に傾けた方向から各点5回を基本とし，10測点ごとにインパクトを反対方向に向けて，逆方向に5回発震した。表面波探査の発震回数は各点5回を基本とした。また，反射法地震探査では震源のプレート，表面波探査では掛矢にハンマースイッチを取り付けて収録トリガをかけた。受振器は，S波反射法地震探査は固有周波数10 Hzの水平動ジオフォン（Geospace製，GS-32CT内蔵）を使用し，水平動成分が測線の方向に直交するように設置した。P波反射法地震探査，表面波探査，微動観測には固有周波数2 Hzの上下動ジオフォン（SUNFULL社製，PS-2B内蔵）を使用した。受振器間隔はS波反射法地震探査に関しては1 m，P波反射法地震探査と表面波探査・微動観測に関しては2 mに設定した。探鉱機はテレメトリ型地震探査システムDSS-12（サンコーコンサルタント製）を使用した。サンプリング間隔は反射法地震探査と表面波探査に関しては0.5ミリ秒，微動観測に関しては1ミリ秒に設定した。反射法地震探査と表面波探査に関しては2秒，微動に関しては1分データを30～60個程度（30分～60分程度）収録した。本調査に用いたDSS-12は，現場で発震原記録の確認やスタックなどの簡単な処理ができるため，調査中に適宜発震記録，発震記録をダイバシティスタックした波形を確認した。

受振点のマーキングにはウォーキングメジャーを使用し，南阿万測線では1 m間隔，北阿万測線では2 m間隔にチョークで印をつけた。受振器の位置はTrimble社のGNSS測量装置であるR10を使用して，VRS方式

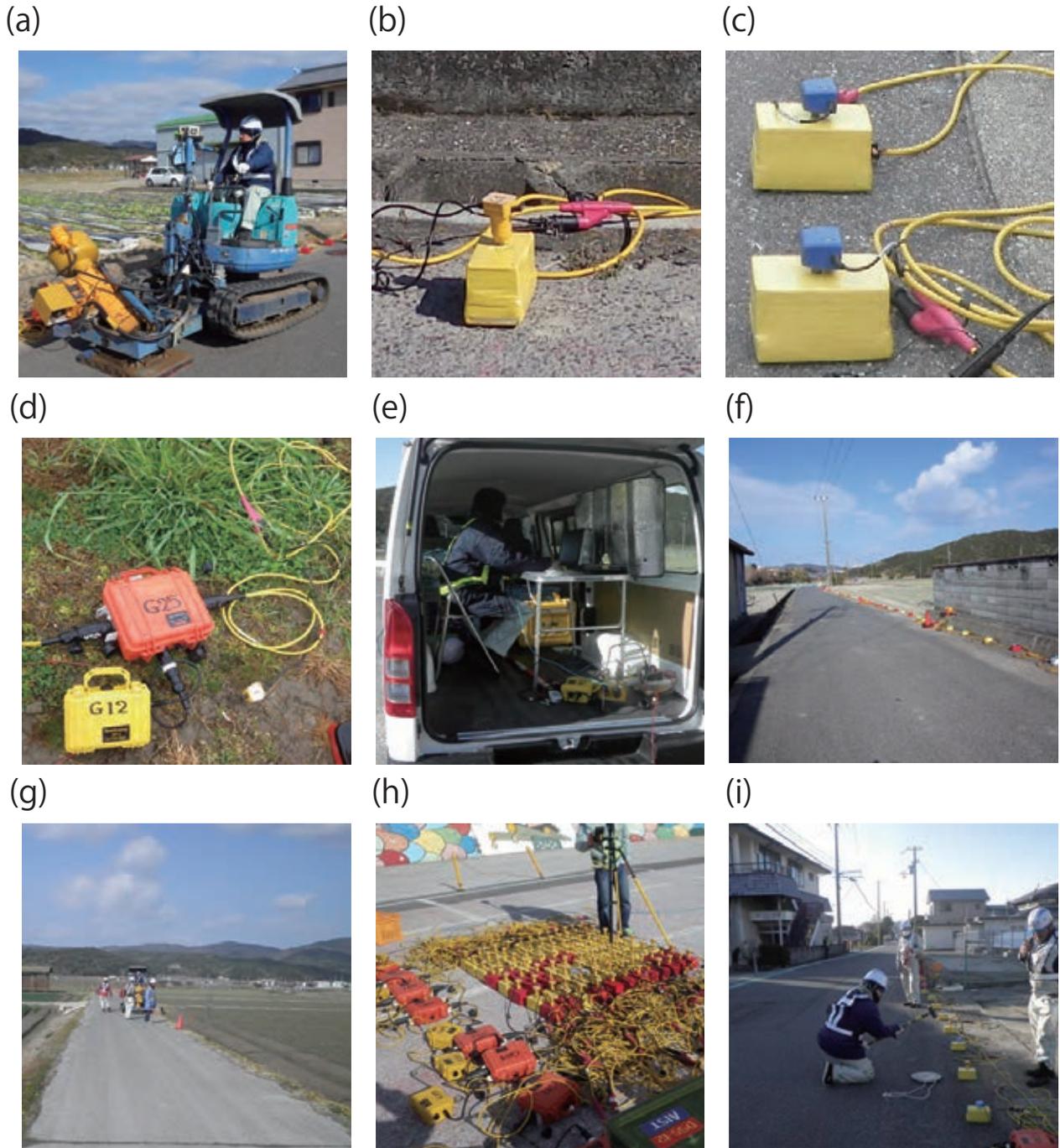
のネットワーク型RTK法で測定した。発震位置については，発震作業の際に受振器からのオフセット距離（ Δx ， Δy ， Δz ）を巻尺で計測し，発震点の位置を計算した。交差点など受振器を設置せずに発震のみ実施した測点，水路上など受振器と発震機のオフセットが大きい測点に関しては，発震位置をチョークでマーキングしてR10で測量した。なお，調査で使用する上下動受振器の特性を確認するため，南阿万測線での測定を開始する前（2月15日）に阿万海岸海水浴場の駐車場（第3図）でハドルテストを実施した。具体的には，上下動受振器をなるべく間隔を開けずに一ヶ所にまとめて設置し，約30分間微動を収録した（第2図）。以下に，それぞれの測線で実施した調査，展開方法，受振・発震点間隔などの詳細を述べる。

4.1.1 南阿万測線（GS-AMS）

南阿万測線では2023年2月16日から23日にかけてS波反射法地震探査・P波反射法地震探査・表面波探査・微動観測を実施した。南阿万測線は阿万海岸海水浴場付近の市道沿いに，阿万東町から阿万西町にかけて設定した（第3図）。測線はボーリング掘削地点（GS-AMN-2）の約130 m東の地点から始まり，市道沿いに西に進み，県道235号線を渡ってボーリング掘削地点（GS-AMN-1）の約50 m西の本庄川まで続く。S波反射法地震探査の測線総延長は807 m，総受振点は808点，P波反射法地震探査と表面波探査の測線総延長は806 m，総受振点は404点とした（第1表，第3図）。測線の方向は概ね東-西で，測点標高は1.4 m～5.6 mであった。受振・発震点番号113から120は市道，385から393は県道を横切するため，受振器は設置せず発震のみ実施した。またS波反射法地震探査の受振・発震点番号510から528付近（P波反射法地震探査の受振・発震点番号255から264付近）は道路の下に水路が通っており，水路を避けて受振・発震作業を実施したため，オフセット距離が大きい。測線は路肩までアスファルトで舗装されており，受振器のスパイクを刺すことができなかった。そのため，粘土とウレタンをビニールテープで固定して土台を作成し，粘着シートで道路に固定し，その土台にスパイクを刺して受振器を固定した（第2図）。南阿万測線のS波反射法地震探査の受振器は192点を同時に設置し，96点発震するごとに展開移動した。P波反射法地震探査と表面波探査の受振器は96点を同時に設置し，48点発震するごとに展開移動した。最後の展開移動の際，受振点数を調整するため，S波反射法地震探査は48点，P波反射法地震探査と表面波探査は24点のみ発震して展開移動した。測線の西端では，S波反射法地震探査は184点，P波反射法地震探査と表面波探査は92点の固定展開として発震した。S波・P波反射

第1表 反射法地震探査・表面波探査・微動観測における調査諸元.
Table.1 Field parameters for the reflection surveys, the surface wave survey,
and the microtremor survey.

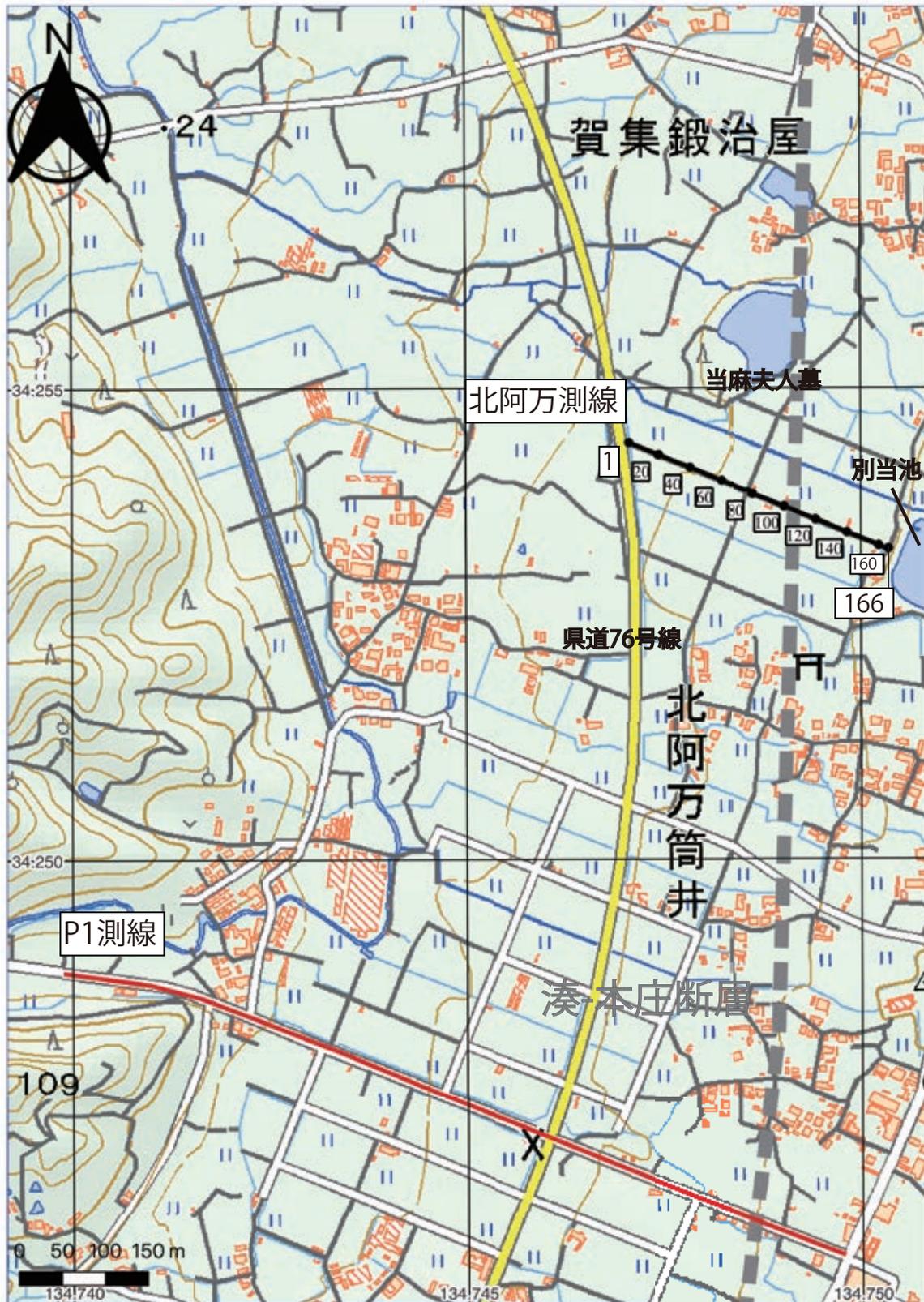
測線名	南阿万測線(S波)	南阿万測線(P波)	南阿万測線(表面波)	南阿万測線(微動)	北阿万測線(P波)	北阿万測線(微動)
調査地区	兵庫県南あわじ市阿万東町～阿万西町	兵庫県南あわじ市阿万東町～阿万西町	兵庫県南あわじ市阿万東町～阿万西町	兵庫県南あわじ市阿万東町～阿万西町	兵庫県南あわじ市北阿万南井地区	兵庫県南あわじ市北阿万南井地区
調査期間	2023年2月16日から2月23日	2023年2月16日から2月23日	2023年2月16日から2月23日	2023年2月16日から2月23日	2023年2月24日から2月25日	2023年2月24日から2月25日
測線長	807m	806m	806m	806m	330m	330m
総発振点数	808	101	101	101	166	166
受振点番号	1-808	1-404	1-404	1-404	1-166	1-166
受振点間隔	1m	2m	2m	2m	2m	2m
受振器	GS32-CT(GeoSpace製)	PS-2B(SUNFULL製)	PS-2B(SUNFULL製)	PS-2B(SUNFULL製)	PS-2B(SUNFULL製)	PS-2B(SUNFULL製)
受振器固有周波数	10Hz	2Hz	2Hz	2Hz	2Hz	2Hz
受振点展開方法	192チャンネルを同時展開し96点ずつ移動(最後は48点で移動して固定展開)	96チャンネルを同時展開し48点ずつ移動	96チャンネルを同時展開し48点ずつ移動	96チャンネルを同時展開し48点ずつ移動	166チャンネルを固定展開	166チャンネルを固定展開
受振点展開番号	1-192, 97-288, 193-384, 289-480, 385-576, 481-577, 578-620-622	1-96, 49-144, 97-192, 145-240, 193-288, 241-336, 289-384, 313-404, 57-59, 167, 168, 193-196, 253, 310, 311	1-96, 49-144, 97-192, 145-240, 193-288, 241-336, 289-384, 313-404, 57-59, 167, 168, 193-196, 253, 310, 311	1-96, 49-144, 97-192, 145-240, 193-288, 241-336, 289-384, 313-404, 57-59, 167, 168, 193-196, 253, 310, 311	1-166	1-166
受振なし	114-119, 163, 309, 317, 318, 334-	311	311	311	-	-
収録装置	DSS-12(サンコーコンサルタント製)	DSS-12(サンコーコンサルタント製)	DSS-12(サンコーコンサルタント製)	DSS-12(サンコーコンサルタント製)	DSS-12(サンコーコンサルタント製)	DSS-12(サンコーコンサルタント製)
記録長	2s	2s	2s	1分×30個	2s	1分×60個
サンプリング間隔	0.5ms	0.5ms	0.5ms	1ms	0.5ms	1ms
震源	P波油圧インパクト(JMS-Mini65-2)	P波油圧インパクト(JMS-Mini65-2)	掛失	-	P波油圧インパクト(JMS-Mini65-2)	-
総発振点数	808	101	101	101	166	166
発振点番号	1-808	1-404	1-404	1-404	1-166	1-166
発振間隔	1m	2m	2m	2m	2m	2m
発震回数	右側から5回, 10測点ごとに左側から5回	5回	5回	5回	5回	5回
測量装置	Trimble R10 GNSS	Trimble R10 GNSS	Trimble R10 GNSS	Trimble R10 GNSS	Trimble R10 GNSS	Trimble R10 GNSS



第2図 反射法地震探査，表面波探査，微動観測の使用機材，調査の様子。

(a) JMS-mini65-2 (地球科学総合研究所製)。(b) 受振器 (上下動)。(c) 受振器 (水平動)。(d) DSS-12 (サンコーコンサルタント製)。(e) 観測本部。(f) 南阿万測線。(g) 北阿万測線。(h) ハドルテスト。(i) 表面波探査。

Fig. 2 Survey systems and field operations of the reflection survey, surface wave survey, and microtremor survey. (a) JMS-mini65-2 (JGI, inc.). (b) vertical geophone. (c) horizontal geophone. (d) DSS-12 system (Suncoh Consultants). (e) observation station. (f) South Ama survey line. (g) North Ama survey line. (h) huddle tests. (i) surface wave survey.



第4図 北阿万測線 (GS-AMN) の測線図。

黒太実線・黒数字は北阿万測線の受振点位置, 受振点番号を示す。基図に国土地理院発行数値地図 25,000 (地図画像) を用いた。灰色破線, 赤実線は第1図と同様。

Fig. 4 Seismic survey map of the North Ama survey line (GS-AMN).

The black solid line and numbers represent the locations and numbers of receiver stations of North Ama survey line, respectively. The gray dashed and red solid line are the same as in the Fig. 1. The base map is the Digital Map 25,000 (Map Image) by GSI.

法地震探査・表面波探査・微動観測の合計4種類の調査に要する時間を短縮するために、以下の要領で収録した。まず、水平動受振器を192点設置し、S波反射法地震探査の発震を測点番号の小さい方から96点実施する。その後、測点番号が偶数の点のみ上下動受振器に付け替えて、P波反射法地震探査の発震を番号の大きい方から48点実施する。次に表面波探査の発震を番号の小さい方から48点実施し、最後に微動を30分程度収録した。微動観測後、受振器を96点展開移動して、表面波探査、P波反射法地震探査、微動観測を実施し、受振器を全て水平動受振器に付け替えてS波反射法地震探査を実施した。このように同じ展開の際に受振器を付け替えて4種類の調査を全て実施した後で展開移動をして測定を進めた。8日間の探査で取得したデータは、S波反射法地震探査、P波反射法地震探査、表面波探査、微動観測でそれぞれ総ファイル数4,047個、2,020個、2,027個、265個であった。

4.1.2 北阿万測線 (GS-AMN)

北阿万測線では2023年2月24日から25日にかけてP波反射法地震探査・微動観測を実施した。北阿万測線は、兵庫県南あわじ市北阿万筒井地区の当麻夫人墓近くの農道・市道に設定した(第1, 4図)。測線は県道76号線から始まり、農道を東に進み、別当池まで続く。測線の総延長は330m、総受振点は166点とした(第1表, 第1, 4図)。測線の方向は概ね西-東で、測点標高は36.1m~43.7mであった。北阿万測線は水野・吉岡(1996)で実施された反射法地震探査測線P1, P2(第1図)の中間に位置し、和泉層群が露出している当麻夫人墓に近い場所に設定した。測線はアスファルトで舗装されていたが、道路路肩は土であったため、受振器のスパイクを路肩に刺して測定を行った。

北阿万測線のP波反射法地震探査の受振器は166点を同時に設置し、固定展開で測定した。測定1日目(2月24日)で微動を含めた全ての発震・収録作業は終わったが、その日は雨が降っており、雨粒が受振器に当たってノイズになったため、天候の回復した2日目に再度発震・収録作業を行った。今後の解析には1日目・2日目両方のデータを使用する。2日間の現地探査で取得したデータ数は、P波反射法地震探査、微動収録でそれぞれ総ファイル数1,666個、122個であった。

4.2 サイスマックコーン貫入試験

本調査は地震探査の南側線に沿って2023年3月1日から4日までの4日間で実施した。第2表に探査諸元、第3図に調査地点位置を記す。湊-本庄断層推定位置の西側に位置する調査地点を西阿万地点(GS-AMW, 中谷ほか, 2022のGS-AMN-1に相当)、東側に位置す

る調査地点を東阿万地点(GS-AME, 中谷ほか, 2022のGS-AMN-2に相当)とよぶ。サイスマックコーン貫入試験は中谷ほか(2022)でボーリング調査が実施された私有地と同じ場所で実施したが、反射法地震探査の測線になるべく近い場所に調査位置を設定したため、ボーリング掘削地点と完全には一致しない(第3図)。

第5図にサイスマックコーン貫入試験の様子を記す。本調査に用いたCPTU(電気式コーン貫入試験)プローブは、先端抵抗 q_c 、周面摩擦 f_s 、間隙水圧 u の三成分を1秒間隔で得ることができることに加えて波形データを収録することができる。また、これらの地盤力学特性値を用いて、地盤の土質区分、換算 N 値などを推定することもできる。また、プローブ内には傾斜計、温度計も内蔵されている。CPTUプローブはロッド先端に装着し、貫入装置を使用して地中に貫入する。本調査に用いた貫入装置CPT6610DT(Geoprobe Systems製)は、重さ2.2t、貫入力は最大160kNで、CPTUプローブを1秒間に2cmずつ圧入するように設計されている。また、反力を得て貫入力を発揮するために、地面にスクリーアンカーを施工して反力装置を設置した。静的圧入による調査では、礫や硬質層にぶつかった際CPTUプローブを圧入できなくなるため、その場合は、貫入機の掘削装置と泥水ポンプを用いて掘削を行い、礫や硬質層の下位から調査を再開することにした。サイスマック試験はCPTUの貫入を0.5mごとに中断し、地表面に設置した木の板を掛矢で両方向から打撃し、CPTUに内蔵されているジオフォンで波形を収録した。掛矢にはハンマースイッチを取り付けて、収録トリガをかけた。発震回数は各深度で波形を確認しながら、深くなるほど回数を増やし、両方向から2~10回ずつとし、データは300ms収録した。サイスマックコーン貫入試験は、CPTUプローブを圧入可能な範囲のみ調査することができるので、中谷ほか(2022)の柱状図を参考にして、目標深度はGS-AMWでは20m、GS-AMEでは10mに設定した。以下にそれぞれの地点におけるデータ取得状況に関して述べる。

4.2.1 西阿万地点 (GS-AMW)

西阿万地点は2023年3月1日から2日までの2日間で実施した。深度0mからCPTUを開始し、深度0.5mから0.5mごとに、深度17.0mまでサイスマック試験を実施した。深度17.24m付近で礫層にぶつかり、貫入できなくなった。CPTUプローブ先端が礫に当たって角度が急変したため、測定を中断し、ロッドを地表まで戻した。その後、深度17.5mまで掘削を実施し、再度ロッドを掘削孔に降ろした。深度17.46mからCPTUを再開したところ、深度17.8mで再度礫層にぶつかり貫入できなくなったため、その位置でサイスマック試験を

第2表 サイスマックコーン貫入試験における調査諸元。

Table. 2 Field parameters for the seismic cone penetration test.

測点名	西阿万地点	東阿万地点
調査地区	兵庫県南あわじ市阿万西町私有地(駐車場)	兵庫県南あわじ市阿万西町私有地(畑)
調査期間	2023年3月1日から3月2日	2023年3月3日から3月4日
貫入機	CPT6610DT (Geoprobe Systems製)	CPT6610DT (Geoprobe Systems製)
収録装置	HT-0590-160 FCS(Vertek製)	HT-0590-160 FCS(Vertek製)
CPTU実施深度	0-17.24m, 17.46-17.80m	0-5.84m, 5.84-7.26m, 7.26-9.21m, 9.39-10.20m, 10.52-12.31m
CPTU記録間隔	2 cm	2 cm
サイスマック試験実施深度(m)	0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5, 5.0, 5.5, 6.0, 6.5, 7.0, 7.5, 8.0, 8.5, 9.0, 9.5, 10.0, 10.5, 11.0, 11.5, 12.0, 12.5, 13.0, 13.5, 14.0, 14.5, 15.0, 15.5, 16.0, 16.5, 17.0, 17.8	0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5, 5.0, 5.36, 6.0, 6.25, 6.5, 7.0, 7.26, 8.0, 8.5, 9.0, 9.5, 10.0, 10.2, 11.0, 11.5, 12.0, 12.31
削孔深度	0-17.5 m	0-5.98m (打撃), 0-7.86m, 0-9.4m, 0-10.55m
震源	掛矢	掛矢
総発震点数	1000	846
発震間隔	0.5 m	0.5 m
発震回数	左右両側から2回ずつ(0.5m), 3回ずつ(1.0m, 1.5m) 5回ずつ(2.0-10.0m), 10回ずつ(10.5-17.8m)	左右両側から2回ずつ(0.5m), 3回ずつ(1.0m, 1.5m) 5回ずつ(2.0-5.0m), 10回ずつ(5.5-12.31m)
測量装置	Trimble R10 GNSS	Trimble R10 GNSS

実施して測定を終了した。西阿万地点においてサイスマック試験を実施した深度は第2表に記載した。2日間の探査で取得した波形データの総ファイル数は1,000個であった。

ク試験を実施した深度は第2表に記載した。2日間の探査で取得した波形データの総ファイル数は846個であった。

5. 取得データ

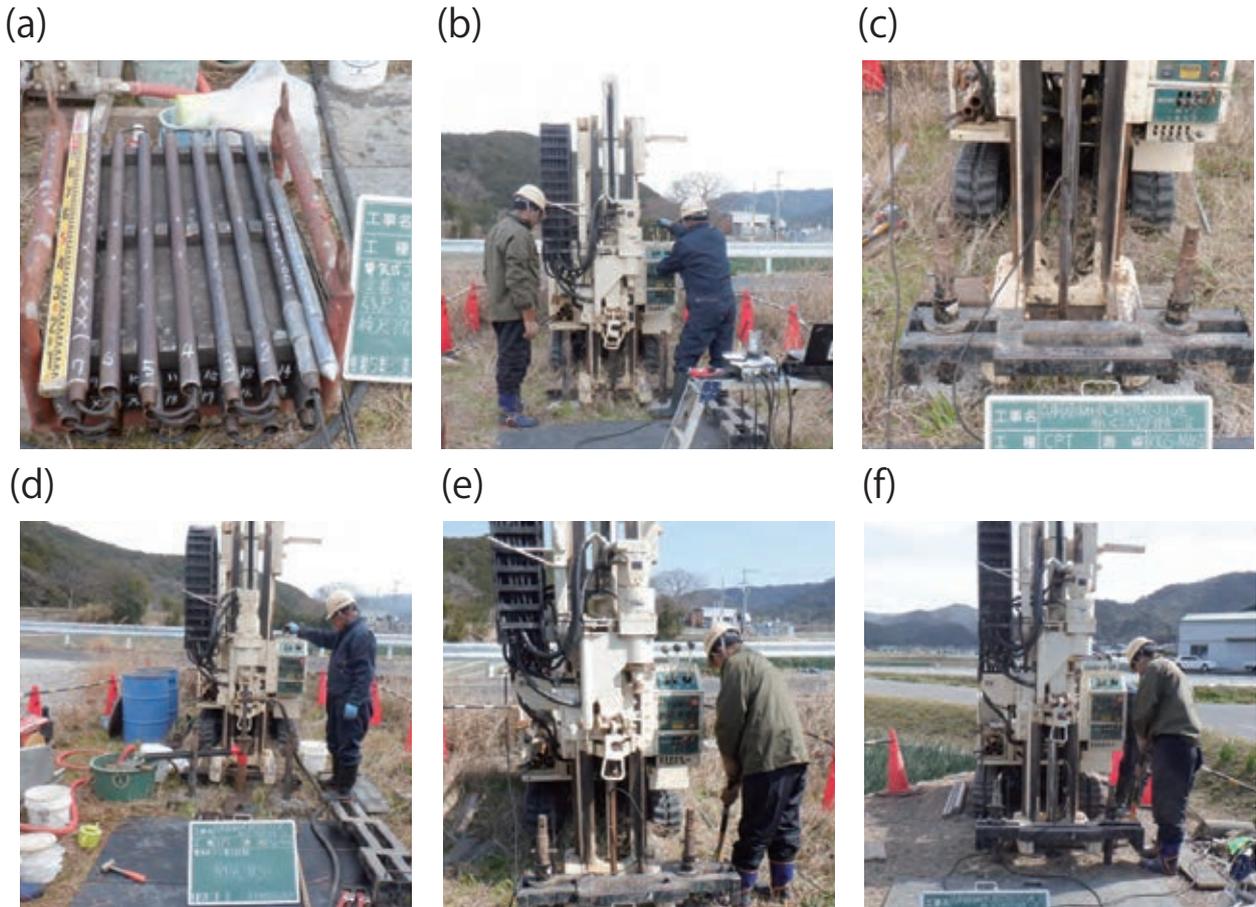
4.2.2 東阿万地点 (GS-AME)

東阿万地点は2023年3月3日から4日までの2日間で実施した。深度0 mからCPTUを開始し、深度0.5 mから0.5 mごとに、深度5.5 mまでサイスマック試験を実施した。深度5.84 m付近で礫層にぶつかり、貫入できなくなったので、専用ロッドによるマシン打撃（パークッション機能）により、深度5.98 mまで礫層を破壊し、深度5.98 mからCPTUを再開した。その後、深度7.26 mで再度礫層にぶつかり、貫入できなくなったので、深度7.86 mまで掘削を実施した。深度7.26 mからCPTUを再開したところ、深度9.21 mで礫層にぶつかったため、深度9.4 mまで掘削を実施した。さらに、深度9.39 mからCPTUを再開したところ、深度10.2 mで礫層にぶつかったため、深度10.55 mまで掘削した。最後に、深度10.52 mからCPTUを再開し、12.31 mで礫層に当たったので、その位置でサイスマック試験を実施して測定を終了した。東阿万地点においてサイスマック

以下にそれぞれの調査で取得したデータに関して説明する。なお、南阿万測線のS波・P波反射法地震探査の予備解析結果に関しては木下・伊藤（2023a）、北阿万測線のP波反射法地震探査の予備解析結果に関しては木下・伊藤（2023b）で公表予定である。

5.1 反射法地震探査

データ処理と表示には反射処理ソフトウェアのGLOBE Claritas (Petrosys, New Zealand)を使用した。DSS-12のフィールド取得データはSEG-2フォーマットなので、GLOBE Claritasで処理するためにClaritas extended SEG-Yフォーマットへ変換した。その後、同じ発震点の記録を並べて目視で確認し、ノイズが卓越するなどの不良トレースを除去し、ウィンドウ長1,000 msのダイバーシティスタックを用いて垂直重合した。第6, 7, 8図は南阿万測線におけるS波・P波反射法



第 5 図 サイスマックコーン貫入試験の使用機材，調査の様子．(a) CPTU プローブとロッド．(b) 貫入機．(c) 反力装置．(d) 削孔．(e) 西阿万地点．(f) 東阿万地点．

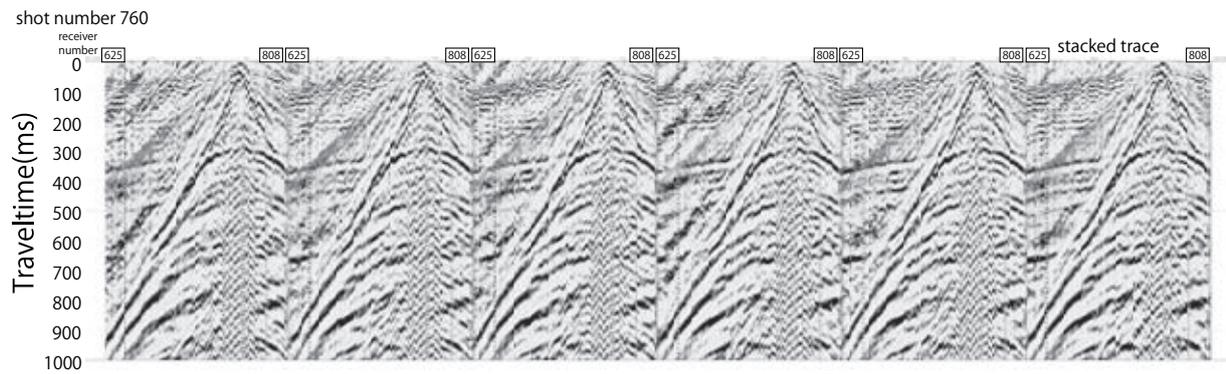
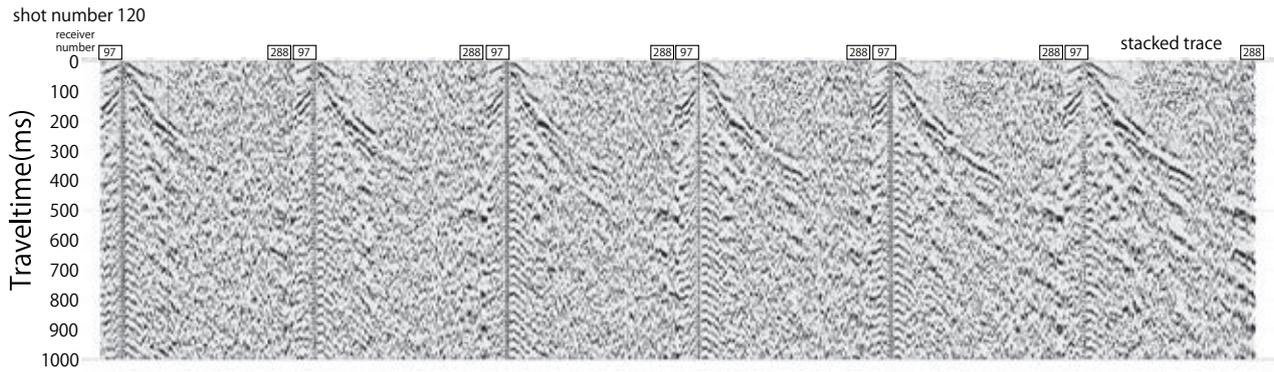
Fig. 5 Survey systems and field operations of the seismic cone penetration test. (a) CPTU probe and rods. (b) Penetrator. (c) Ground Anchors. (d) mud drilling. (e) West Ama survey point. (f) East Ama survey point.

地震探査，北阿万測線の P 波反射法地震探査の原データを振幅調整して表示した例である．今回の探査では，人（徒歩），自転車，車の振動，強風，雨粒などが主なノイズ源となった．第 6，7，8 図の一番右は垂直重合後に振幅を調整したトレースを表し，垂直重合によってノイズが軽減して良好な記録になることがわかる．第 9，10，11 図は南阿万測線における S 波・P 波反射法地震探査，北阿万測線の P 波反射法地震探査の原データを垂直重合後，振幅調整したショットギャザを表す．南阿万測線における S 波・P 波反射法地震探査は測点番号 80，40 ごとに，北阿万測線の P 波反射法地震探査は測点番号 20 ごとに表示した．南阿万測線における S 波反射法地震探査では P 波起源と想定される見かけ速度の大きい相があり，初動を認識することが難しい．10 測点ごとに反対方向からも打撃したので，今後波形の差分を計算し，P 波起源の相を確認しながら解析を進める必要がある．しかしながら，反射波と推定される振幅の大きい波群も複数認められる．多重反射の可能性もあるが，最大で往復走時 800 msec 程度までイメー

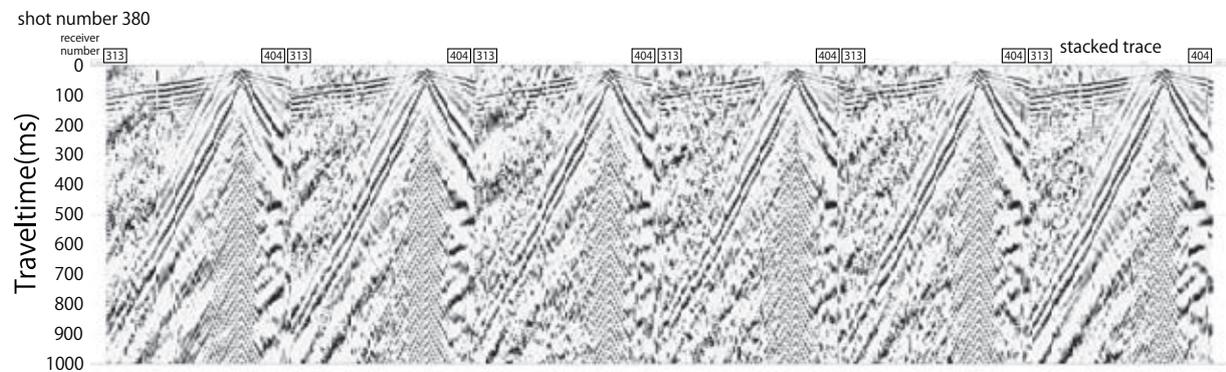
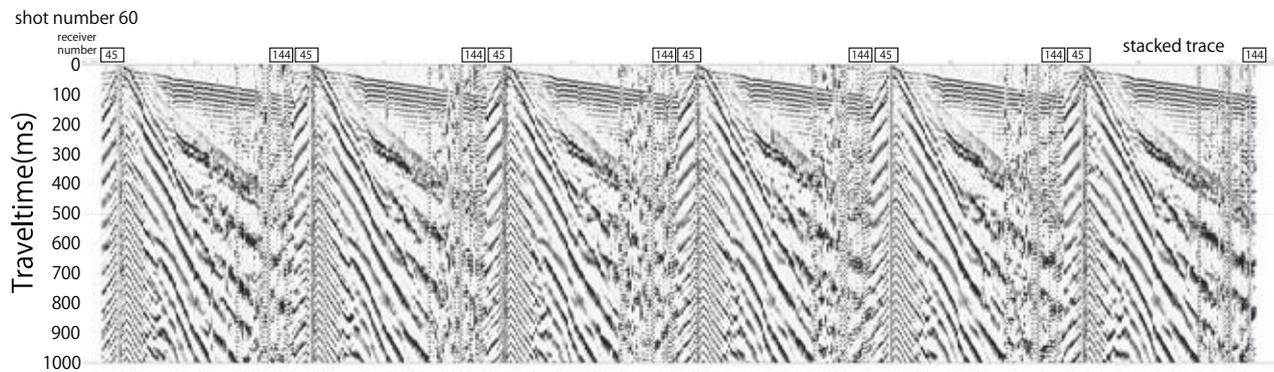
ジングできると期待される．南阿万測線における P 波反射法地震探査では，見かけ速度約 1,800 ~ 2,000 m/s の初動が最大オフセットまで到達している．また，見かけ速度約 150 ~ 300 m/s の表面波が認められる．初動と同じ傾きの相が卓越しており，S 波と比較して反射波ははっきりしないものの，一部の測点では反射波と推定される波群が認められる．北阿万測線における P 波反射法地震探査では，見かけ速度約 1,800 m/s の初動が最大オフセットまで到達している．また，見かけ速度約 200 ~ 300 m/s の表面波が認められる．南阿万測線同様，初動と同じ傾きの相が卓越しており，特に測点番号の小さい西側では反射波ははっきりしないものの，東側では反射波と推定される波群が認められる．今後，通常のコモン反射点重合法（CMP 重合法，Sheriff and Geldart, 1995 など）を用いて処理を進める予定である．

5.2 表面波探査

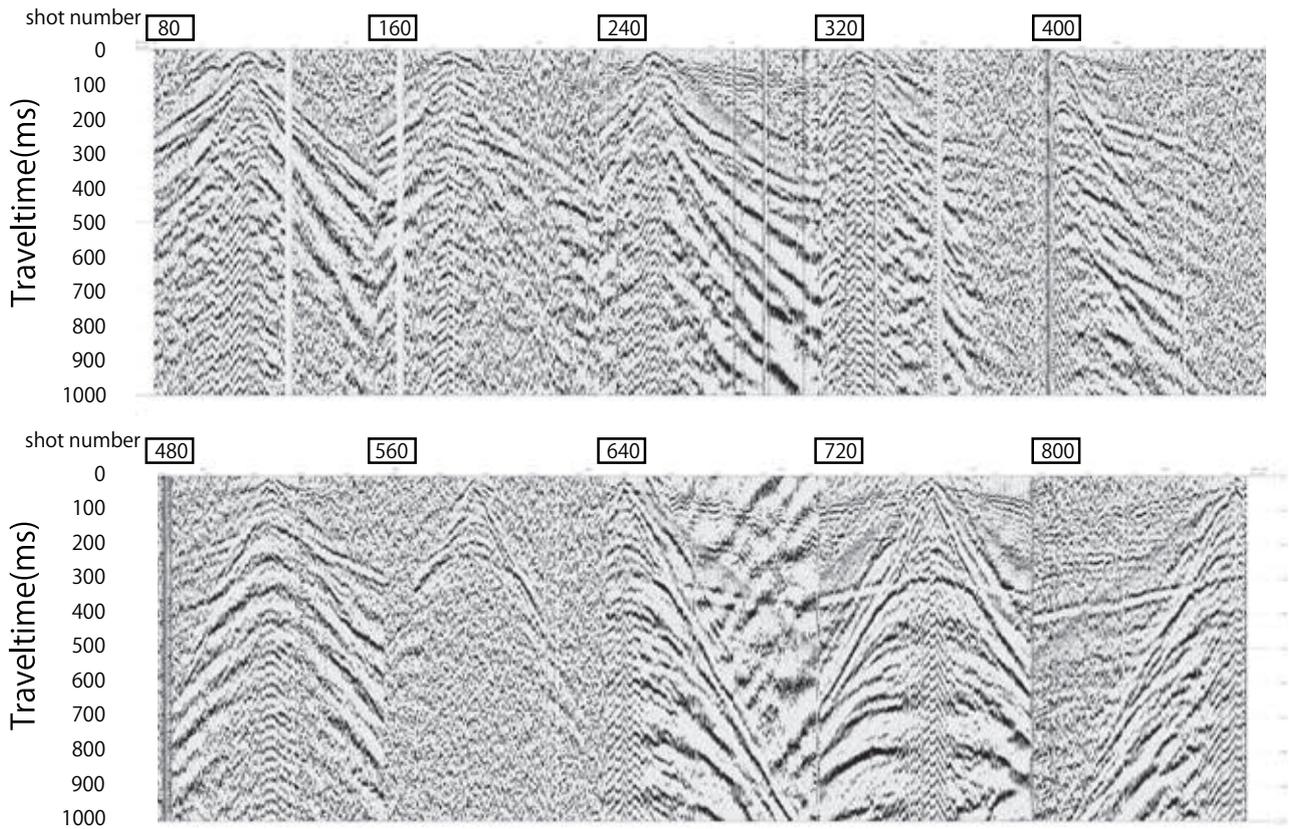
表面波探査のデータ処理には，今後表面波処理ソフトウェア SeisImager/2D（応用地質製）を使用する予



第 6 図 南阿万測線の S 波反射法地震探査における発震記録(発震点 120, 760). 横軸が受振・発震点で縦軸が往復走時を表す.
 Fig. 6 Examples of shot records at shot-number 120 and 760 for the S wave reflection survey on South Ama survey line. Horizontal and vertical axes are receiver channel and two-way traveltimes, respectively.



第 7 図 南阿万測線の P 波反射法地震探査における発震記録 (発震点 60, 380). 横軸・縦軸は第 6 図と同様.
 Fig. 7 Examples of shot records at shot-number 60 and 380 for the P wave reflection survey on South Ama survey line. Horizontal and vertical axes are the same as in Fig. 6.



第9図 南阿万測線のS波反射法地震探査における発震記録を垂直重合し、振幅調整を行った波形。縦軸・横軸は第6図と同じ。
Fig. 9 Stacked shot records with gain control after diversity stack of shot gathers for the S wave reflection survey on South Ama survey line. Horizontal and vertical axes are the same as in Fig. 6.

5.4 サイスマックコーン貫入試験

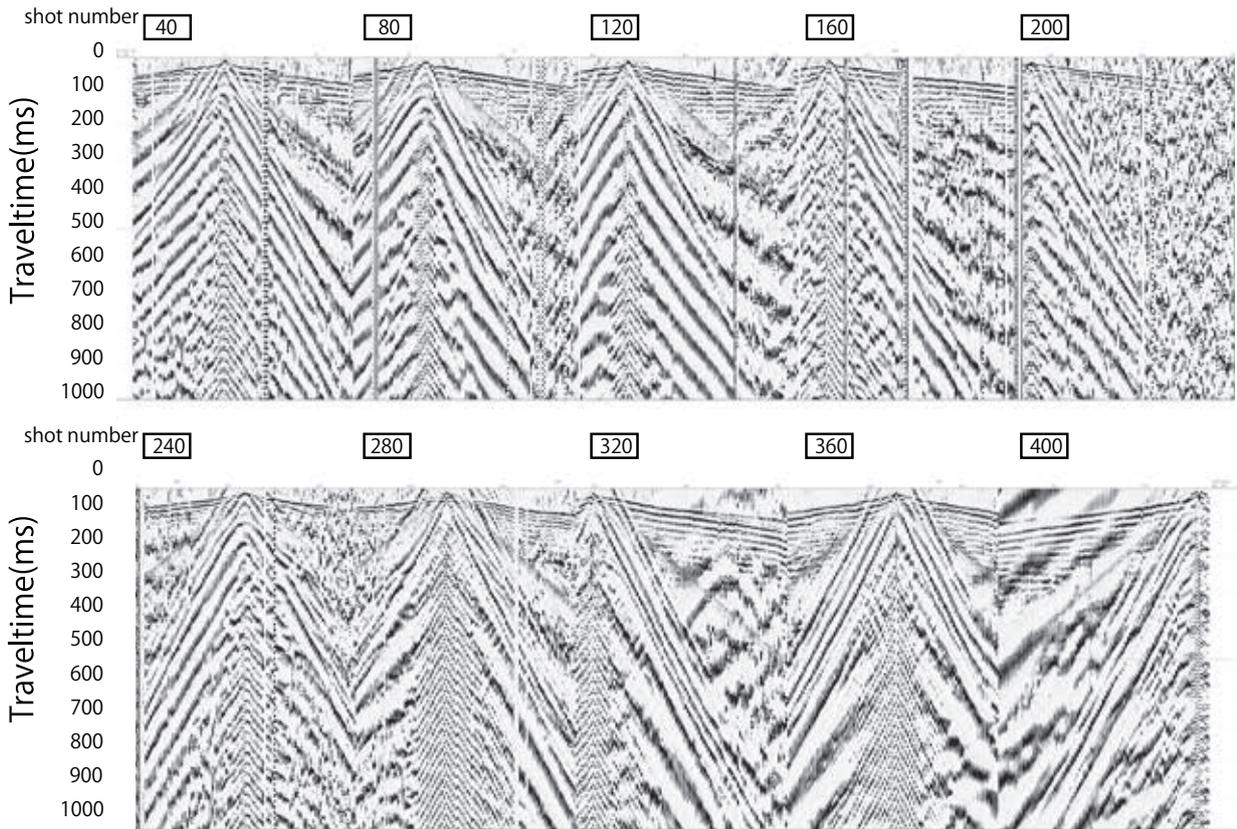
サイスマックコーン貫入試験の波形データはcsv形式で収録された。第14図に西阿万地点の原データの一例を示した。黒線は取得原データ、赤線は同じ深度、発震方向、センサーの波形をスタックしたものであるが、スタックによってノイズが軽減し、良好な記録になることがわかる。CPTUプローブ内のジオフォンの方位は未知であるため、板の右側、左側から発震した波形を、水平2成分それぞれスタックした後に、最大振幅方位を推定して合成する必要がある。今後、データ品質を確認し、初動読み取り、S波速度の推定、さらに可能であればVSP処理も実施する予定である。

6. まとめ

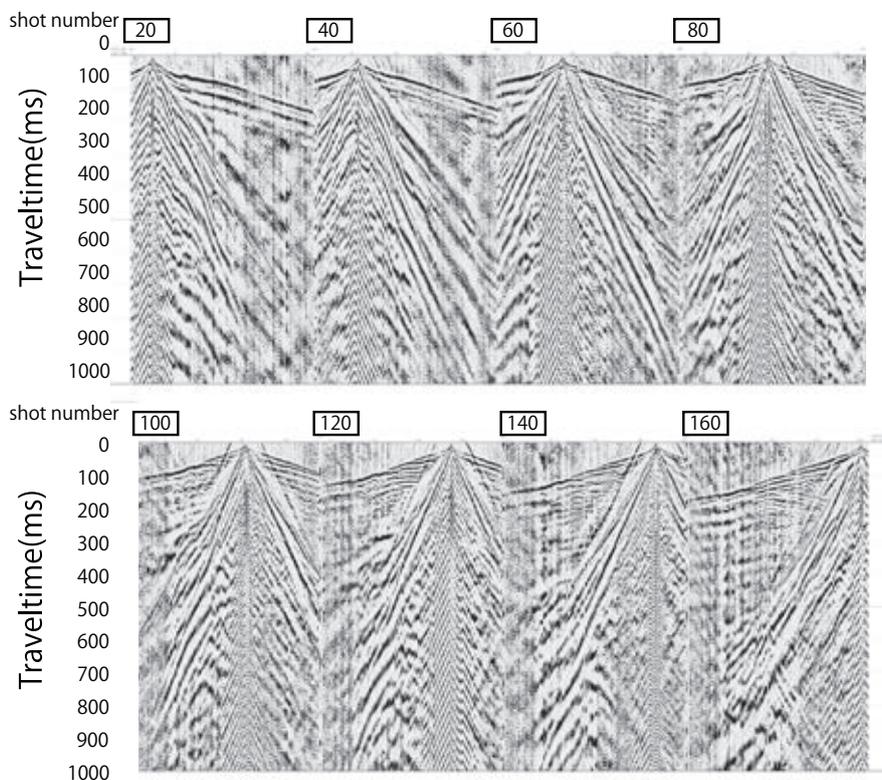
淡路島南西部に分布する湊-本庄断層の位置、地下の変形構造などを明らかにするために、兵庫県南あわじ市において浅部地下構造調査を実施した。南阿万測線(GS-AMS)においては、S波・P波反射法地震探査、表面波探査、微動観測を実施し、北阿万測線(GS-AMN)においては、P波反射法地震探査、微動観測を実施し

た。また、南阿万測線上の2ヶ所の私有地、西阿万地点(GS-AMW)と東阿万地点(GS-AME)においてサイスマックコーン貫入試験を実施した。全ての調査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て、調査地域の地下浅部構造を明らかにしたい。

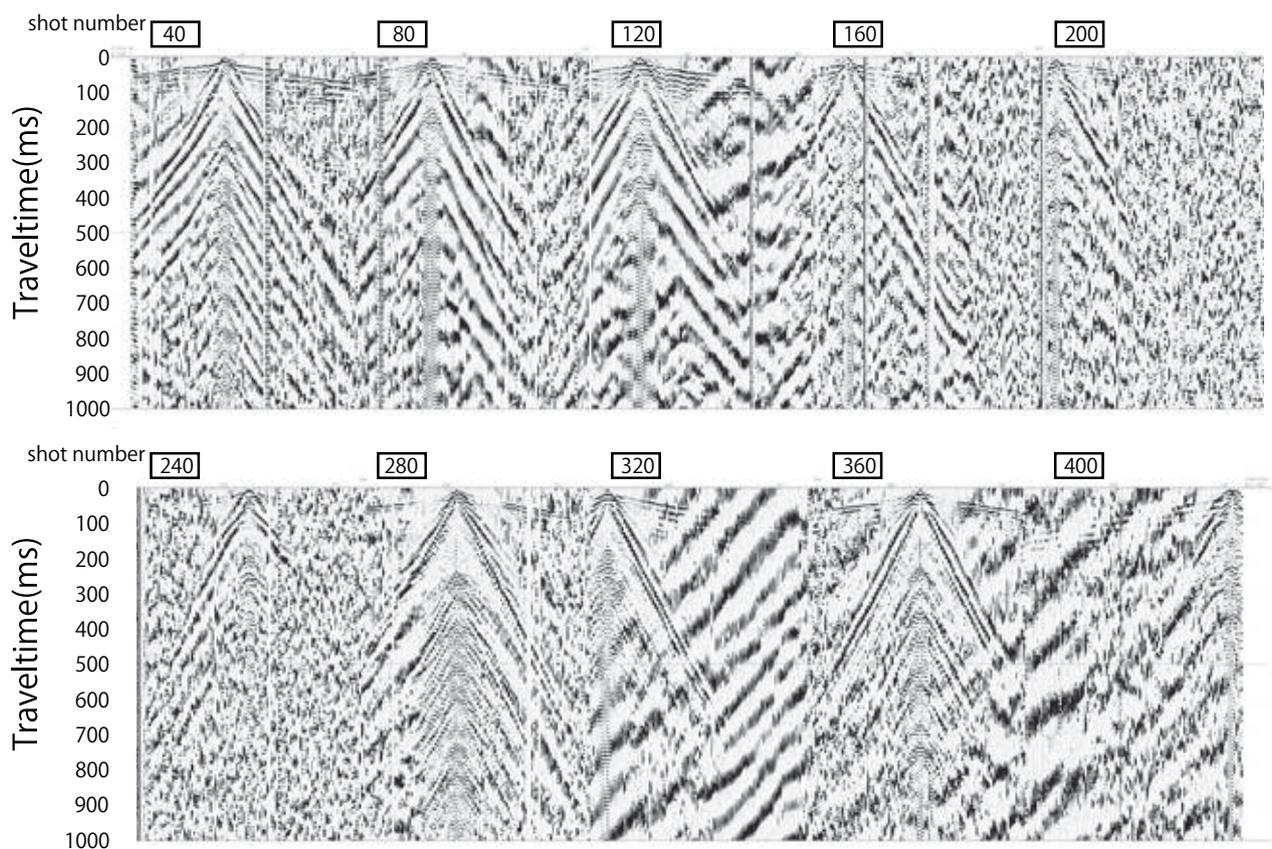
謝辞: 本調査の測線設定に際し地質情報研究部門の中谷是崇氏、水野清秀氏から助言をいただいた。また、稲崎富士氏にサイスマックコーン貫入試験に関する助言をいただいた。反射法地震探査、表面波探査、微動観測の実施にあたり、兵庫県南あわじ市役所(産業建設部建設課)、阿万西町の自治会長様、阿万東町の自治会長様、北阿万筒井地区の自治会長様、阿万市民交流センターの館長様にご協力いただいた。サイスマックコーン貫入試験の実施にあたり、調査地点の地主様に多大な便宜を図っていただいた。現地でのデータ取得に関しては(株)ジオシス、(株)地盤試験所にご協力いただいた。また、反射法のデータ処理と図の作成にはPetrosysのGLOBE Claritas、一部の図の作成にはQGIS、GMT(Wessel *et al.*, 2019)を使用した。記して感謝の意を表します。



第10図 南阿万測線のP波反射法地震探査における発震記録を垂直重合し、振幅調整を行った波形。縦軸・横軸は第6図と同じ。
 Fig. 10 Stacked shot records with gain control after diversity stack of shot gathers for the P wave reflection survey on South Ama survey line. Horizontal and vertical axes are the same as in Fig. 6.

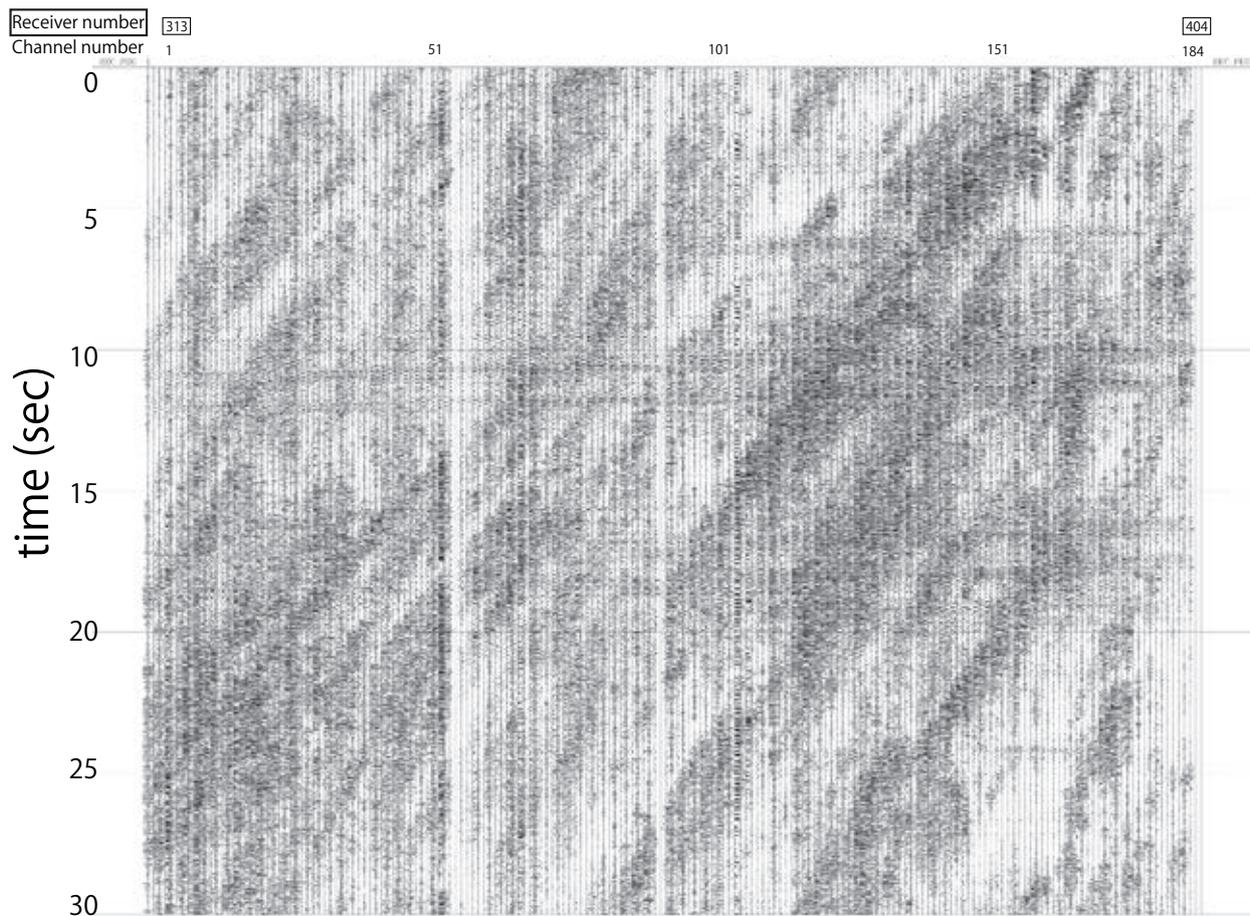


第11図 北阿万測線のP波反射法地震探査における発震記録を垂直重合し、振幅調整を行った波形。縦軸・横軸は第6図と同じ。
 Fig. 11 Stacked shot records with gain control after diversity stack of shot gathers for the P wave reflection survey on North Ama survey line. Horizontal and vertical axes are the same as in Fig. 6.



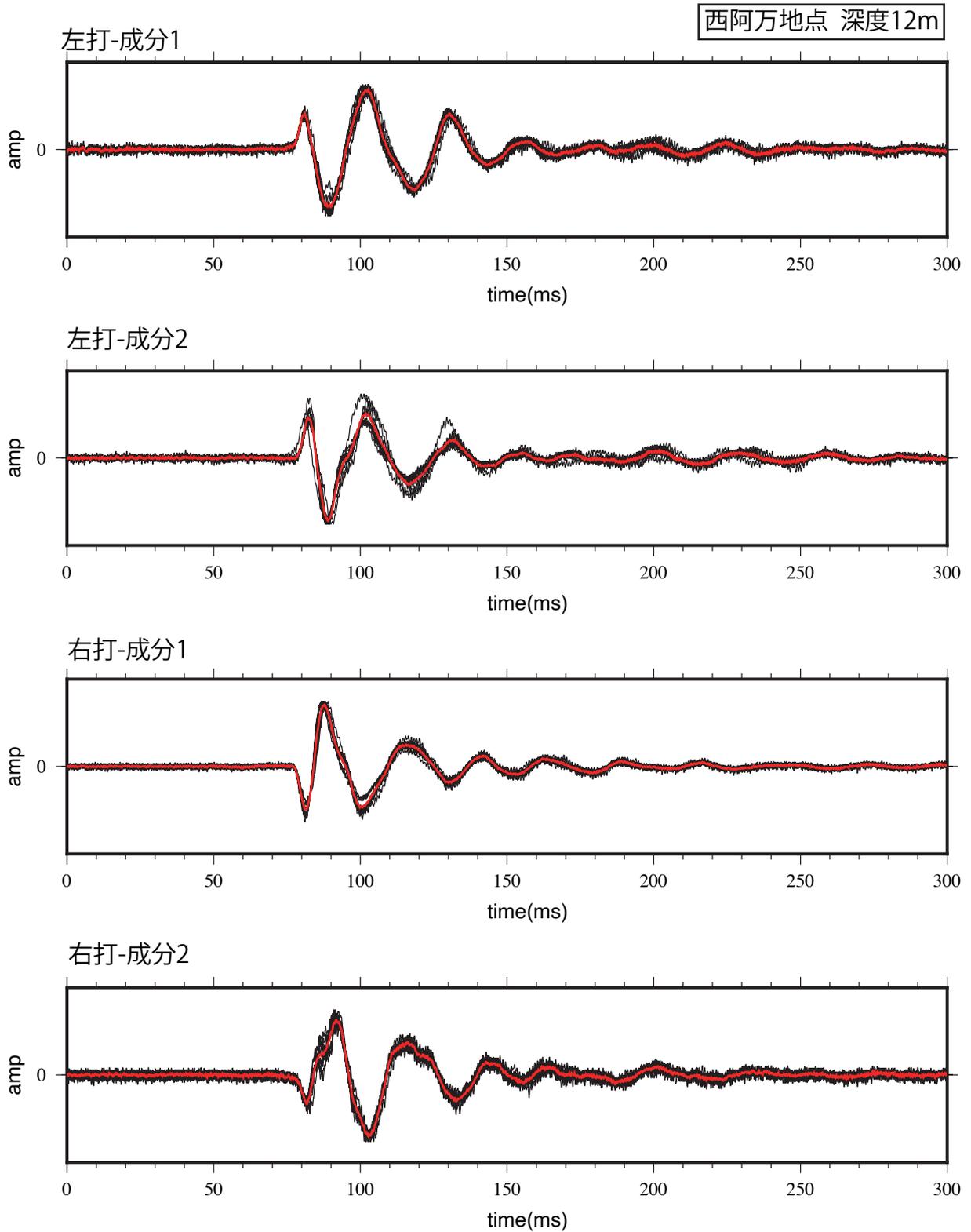
第 12 図 南阿万測線の表面波探査における発震記録を垂直重合し，振幅調整を行った波形．縦軸・横軸は第 6 図と同じ．

Fig. 12 Stacked shot records with gain control after diversity stack of shot gathers for the surface wave survey on South Ama survey line. Horizontal and vertical axes are the same as in Fig. 6.



第 13 図 微動観測の原記録例。縦軸が時間，横軸が受振点を表す。

Fig. 13 Examples of raw traces at all receivers for the microtremor survey. Vertical and horizontal axes are time and receiver points, respectively.



第 14 図 サイスマック試験の波形例。縦軸は振幅，横軸が時間を表す。

Fig. 14 Examples of raw traces of seismic cone penetration tests. Vertical and horizontal axes are amplitude and time, respectively.

文 献

- 物理探査学会 (2016), 物理探査ハンドブック増補改訂版.
- Hayashi, K. and Suzuki, H. (2004) CMP Cross-Correlation Analysis of Multi-Channel Surface-Wave Data. *Exploration Geophysics*, **35**, 7–13. <https://doi.org/10.1071/EG04007>. (2023年10月23日確認)
- 兵庫県 (1982): 土地分類基本調査「由良・鳴門海峡」, 表層地質図(5万分の1)ならびに同説明書. 兵庫県, 75p.
- 稲崎富士・長沢政和・阿部昌彦 (1989), VSP を利用した浅部地盤の評価, 日本応用地質学会講演予稿集, 93–96.
- 稲崎富士・加野直巳 (2020), PS 検層をめぐる技術的過大 (その5), サイスマックコーンを用いた高精度 S 波 VSP と高分解能 S 波反射法断面との対比, 物理探査学会第 143 回学術講演論文集, 201–204.
- 活断層研究会 (1991), 新編 日本の活断層 分布図と資料. 東京大学出版会, 440p.
- 木下佐和子・伊藤 忍 (2023a), 兵庫県南あわじ市阿万地区における S 波・P 波反射法地震探査の実施, 日本地震学会 2023 年度秋季大会.
- 木下佐和子・伊藤 忍 (2023b), 兵庫県南あわじ市における浅部反射法地震探査の実施, 物理探査学会第 149 回学術講演会講演論文集.
- 木下佐和子・伊藤 忍・山口和雄 (2023): 反射法地震探査による西三河平野南西部の浅部地下構造, 海陸シームレス地質情報集「伊勢湾三河湾沿岸域」.
- 牧本 博・利光誠一・高橋 浩・水野清秀・駒澤正夫・志知龍一 (1995): 20 万分の 1 地質図「徳島」. 地質調査所.
- 水野清秀・吉岡敏和 (1996): 淡路島南西部, 湊 – 本庄断層のボーリング, 浅層反射法弾性波探査等による活動調査 (平成 7 年度活断層調査報告 no. 10), 地質調査所研究資料集, no. 234.
- 中谷是崇・羽田裕貴・水野清秀・中島 礼 (2022): 兵庫県淡路島南部における湊 – 本庄断層付近の第四系ボーリング調査, 地質調査総合センター速報 no. 83, 令和 3 年度沿岸域の地質・活断層調査研究報告, p.61–76.
- 西田 薫・高村 透・渋谷 啓 (1999), サイスマックコーン試験の方法と調査例, 土と基礎, **47**, 34–36.
- 岡田篤正・楮原京子・熊原康博・澤 祥・廣内大助 (2014), 1:25,000 都市圏活断層図「鳴門海峡」, 国土地理院技術資料. D1-no. 719.
- 岡田篤正・熊原康博 (2014): 1:25,000 都市圏活断層図 六甲・淡路島断層帯とその周辺「洲本」「由良」「鳴門海峡」解説書. 国土地理院技術資料 D1-no. 722, 30p.
- R. E. Sheriff and L. P. Geldart, “*Exploration Seismology*”, 2nd Edition, Cambridge University Press, Cambridge, 1995. doi:10.1017/CBO9781139168359.
- 鈴木晴彦・小西千里・谷田貝 淳・佐藤 将・小河原敬徳・櫻井 健・甲斐田康弘・鈴木 徹・高橋広人・稲崎富士 (2020), 2 次元微動アレイ探査を用いた深部地盤構造探査つくば市における適用例, 物理探査, **73**, p. 209–217.
- Wessel, P., Luis, J. F., Uieda, L., Scharroo, R., Wobbe, F., Smith, W. H. F., and Tian, D. (2019). The Generic Mapping Tools version 6. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **20**, 5556–5564. <https://doi.org/10.1029/2019GC008515>. (2023年10月23日確認)
- 山口和雄・伊藤 忍・木下佐和子 (2019), 反射法地震探査による九十九里平野沿岸陸域の浅部地下構造. 海陸シームレス地質情報集「房総半島東部沿岸域」. 36p.