

3. 研究報告

3. 1 構造探査に基づく震源断層システムの解明

(1) 業務の内容

(a) 業務題目 構造探査に基づく震源断層システムの解明

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名
国立大学法人 東京大学地震研究所	教授	佐藤 比呂志
同	教授	篠原 雅尚
同	助教	石山 達也
国立大学法人 東京海洋大学	准教授	鶴我 佳代子
同	教授	林 敏史
同	教授	近藤 逸人
同	准教授	青山 千春
同	准教授	中東 和男
学校法人 東海大学	准教授	馬場 久紀
公益財団法人 地震予知総合研究振興会	副主席主任研究員	伊藤 谷生

(c) 業務の目的

富士川河口断層帯とプレート境界断層の関係を明らかにするために、駿河トラフ横断海陸統合地殻構造探査を含め海陸での制御震源による地殻構造探査を行う。陸域においては、既存資料を活用しつつ反射法地震探査を行い震源断層から浅部にいたる断層システムの形状を明らかにする。

(d) 3 ヶ年の年次実施業務の要約

1) 平成 29 年度：

駿河トラフ周辺の地質構造を明らかにするために、東京海洋大学が保有するマルチチャンネル反射法地震探査データのうち、本事業では 105.4 km について統合的な処理を行った。とくに測線交点での速度構造の連続性に留意し多重反射抑制処理により、地質構造の解明に繋がる反射法地震探査断面を得た。これらの探査時に東海大学による海底地震計観測で取得されたデータをもとに、屈折法・広角反射法による統合的構造解析を実施した。また駿河湾北部で海底自然地震観測を行った。

2) 平成 30 年度：

富士川河口断層帯南方延長部の震源断層の形状を明らかにするために、駿河トラフを横断する約 60 km の区間で反射法ならびに屈折法による海陸統合地殻構造探査を実施した。海域では東京海洋大学の神鷹丸に搭載した 1950 cu inch のエアガンで発震し、東海大が設置した海底地震計と東京大学が陸上に設置した受振器で記録した。また陸上では東京大学が地下発破などを用いた高エネルギー発震を行った。得られた海陸統合データ等から反射

法地震探査断面を作成した。東海大学は、4 台の海底地震計を用いて駿河湾北部で自然地震を実施した。

3) 平成 31 年度：

地震研究所は、平成 30 年度に取得した駿河湾横断地殻構造探査データの解析を進める。富士川河口断層帯および身延断層帯の震源断層の形状について、サブテーマ 2 とサブテーマ 3 における研究成果も合わせて、サブテーマ 5 の基になる震源断層の形状モデルを取りまとめる。

東京海洋大学は、平成 30 年度に駿河湾で取得したマルチチャンネル反射法地震探査データについて解析を行う。平成 29 年度に解析した反射法地震探査断面も含め、総合的に駿河湾内の富士川河口断層帯の延長部など主要断層の浅部構造を明らかにする。

東海大学は、取得した海底地震観測データと地殻構造探査資料を解析し、駿河湾北部での地震活動ならびに速度構造を明らかにする。

(2) 平成 30 年度の成果

(2-1) 駿河湾横断地殻構造探査

佐藤比呂志・篠原雅尚・石山達也（東京大学地震研究所）
鶴我佳代子・林 敏史・中東和男・山中順子（東京海洋大学）
馬場久紀（東海大学）

(a) 業務の要約

富士川河口断層帯の深部から浅部までの震源断層-活断層システムの形状を明らかにするため、南部延長部の駿河湾北部を横断する海陸約 60 km の測線で、海陸統合地殻構造探査を実施した。測線は、西北西-東南東方向に静岡市葵区から清水区の約 30km の陸域区間、清水沖から伊豆半島の沼津市に至る 20 km の海域区間、伊豆半島の沼津市から伊豆市までの約 10 km の陸域区間から構成される。陸域区間、計 40 km には 295 点の独立型受振器を展開し、20 km の海域の水深 500 m の区間には 18 台の海底地震計を設置した。さらに、清水沖には浅海型の海底地震計 5 台を設置した。陸域には静岡側の測線で 3 点、伊豆半島側で 1 点の薬量 200 kg の含水火薬による発破を行った他、海域では 1950 cu.inch のエアガン発震を行った。得られた深部反射法地震断面に、ストリーマケーブルによって取得したマルチチャンネル反射法地震探査データ（2-2 参照）を統合し、統合反射法地震探査断面を得た。

(b) 業務の成果

1) 調査地域の地質概要と調査測線

駿河湾は陸/海のプレート境界である南海トラフの東端に位置し、トラフ軸にはプレート境界断層が位置し、その陸上延長が富士川河口断層帯であると考えられている（地震調査研究推進本部地震調査委員会,1998;2010）。その地質構造は南北に伸びる駿河トラフを境に東側の伊豆半島と西側の静岡市側で大きく異なる。伊豆半島は、伊豆-小笠原弧に属し中新統から鮮新統の海底火山噴出岩が分布する（狩野・伊藤, 2016）。陸上ではこの海底火山噴出岩を覆って、約 100 万年以降に噴出した陸上の火山噴出物に覆われる（小山, 2010）。

駿河湾の海底には、西に傾斜する火成岩類が音響基盤を構成し、その上位には土肥沖層群・加茂沖層群などの鮮新世から第四紀の堆積層が重なる(岡村・他, 1999; 佐藤・荒井, 2016)。静岡側の赤石山脈南部から駿河湾に至る陸域には、瀬戸川層群・静岡層群に至る古第三紀から新第三紀の付加帯から前弧海盆堆積物岩が分布する(杉山・他, 1982; 杉山・下川, 1990; 杉山・松田, 2014)。これらの地層は、伊豆半島の衝突とフィリピン海プレートの西北西進にともない、大きな短縮変形を被り、北北東-南南西方向の走向を示す。富士川河口断層帯はフィリピン海プレートと陸のプレートの境界の北方延長とされているが、その詳細な構造は明らかにされていない。ここでは、プレート境界を確実に横断するために相模湾を横断する測線を設定した。調査測線は、赤石山脈南部の静岡市葵区から、相模湾を横断し、伊豆半島の沼津市に至る全長約 60 km の区間である(図 2)。



図 1 相模湾横断地殻構造探査測線周辺の地質図と測線図

紫色四角: 発破点、SP:発破点番号、青線:受振点設置ルート、青丸:受振点番号、黒直線:重合測線、黒字数字:CDP 番号、地質図は産業技術総合研究所の地質図 Navi (<https://gbank.gsj.jp/geonavi/geonavi.php#11,35.13501,138.49554>)

本地殻構造探査を実施するにあたり、静岡県、静岡市、静岡県漁業協同組合連合会および由比・小川・戸田漁業組合の方々には、探査にご協力いただいた。ここに記して謝意を表す。また、本地殻構造探査には、本重点的調査・観測経費の他、東京大学地震研究所の経費も使用して実施した。

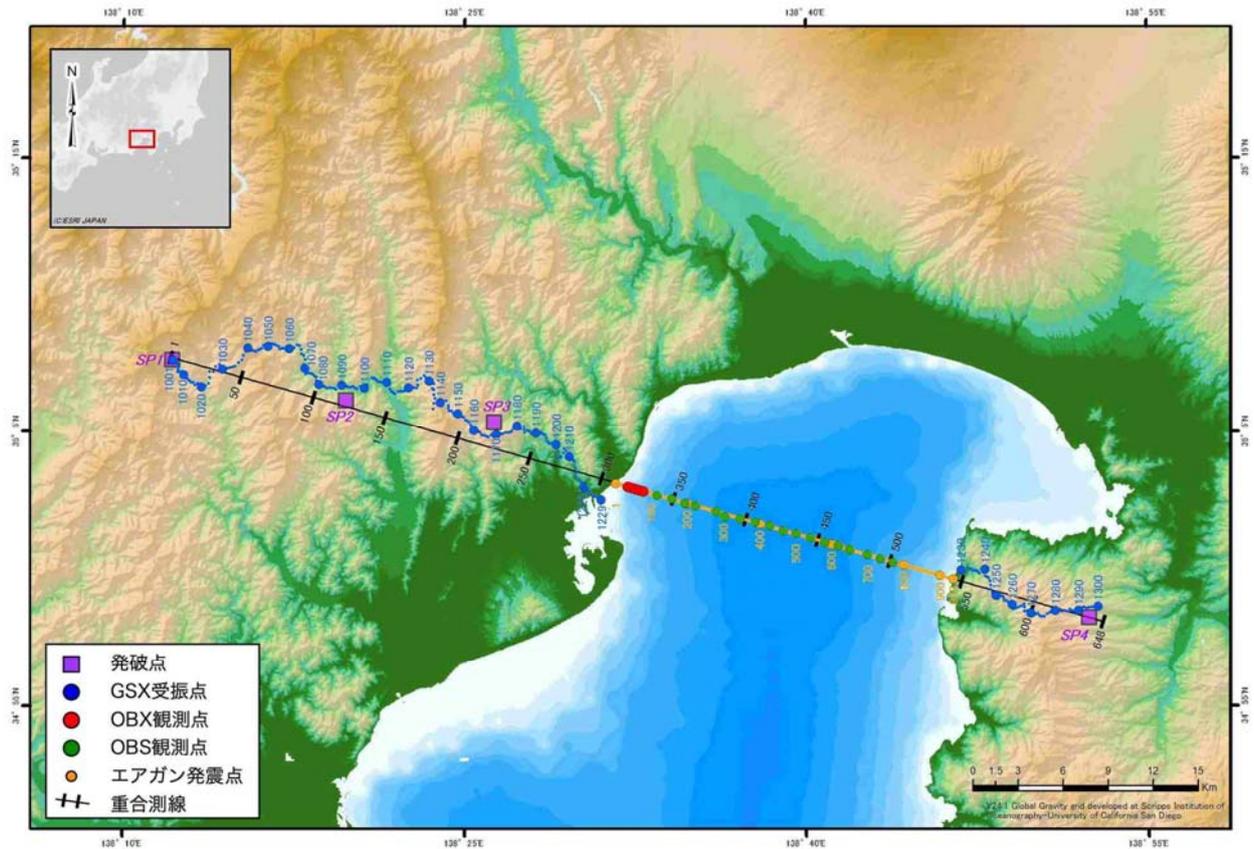


図 2 駿河湾横断地殻構造探査測線図。 SP1~4: 発破点番号、青字:受振点番号、黒字:CDP番号、黄色字:ストリーマケーブル反射法地震探査の CDP 番号。

2) データ取得 (表 1)

a) 陸域測線における受振器設置

陸域測線における受振展開は投影測線上に 100~200 m 間隔で 295 点設定し、実際の受振展開が可能な道路に再投影して受振点位置を決定した。静岡側測線上で 224 点、伊豆半島側測線上で 71 点となる。観測装置として地震研究所所有の GPS 刻時装置、バッテリー、AD 変換器及びデジタル記録機器を内蔵した 3 ch 仕様の独立型受振システム GSX-3 を使用した。受振器は、地震研究所の固有周波数 4.5 Hz の 3 成分受振器 GS-11D を使用した。受振器設置作業は発震予定日 9 月 30 日の前 2 日間に実施した。受振予定位置を基準として携帯型 GPS による座標位置をあわせて北向きを正位置として設置した。発破予定日直前の 9 月 30 日の台風第 24 号通過に伴い、一部受振器の位置が変動していたため、再設置を行った。観測作業終了後の 10 月 4~6 日に受振器を回収した。この際に、3 台の受振器が未回収となったため上記設置数にはこれを含めない。

b) 浅海域測線における受振器設置

浅海域測線における受振展開は、約 1 km の区間に約 250 m 間隔で 5 点の受振点を設置した。観測装置としては浅海用独立型観測装置 OBX を使用した。OBX には 3 成分地震計およびハイドロフォンが内蔵され、内蔵センサにより時刻、方位および傾斜を記録できる。各 OBX はロープでつながれ、陸側端にマーカースイを設置し、海側端には切り離し装置を付属したアンカーを設置した。各 OBX には位置測定のためのトランスポンダを設置し

た。受振器設置作業は 9 月 25 日に実施した。投入前に水深を測定し、連結した OBX を投入後にはアコースティック位置測量を実施した。観測作業終了後の 10 月 5 日に、再度アコースティック位置測量を実施し、受振器の回収を行った。9 月 30 日台風第 24 号通過により一部 OBX の位置座標が変動していたため、発破時刻に合わせて回収時の位置座標を採用した。

表 1 データ取得仕様一覧

調査測線				
総測線長	約 60km			
調査測線位置	静岡市側(陸域)	駿河湾 (西側沿岸海域)	駿河湾 (水深500m以深)	伊豆半島側(陸域)
発震系パラメータ				
震源	含水爆薬	エアガン(1950cu.in.)		含水爆薬
標準発震点間隔	10km	25m(50m往復中点発振)		10km
発震点深度	60m	10m		60m
薬量/ガン圧	200kg	2000psi		200kg
総発震点数	3点	788点(2重合)		1点
受振系パラメータ				
標準受振点間隔	100~200m	250m	1km	100~200m
受振器	4.5Hz3成分速度計	ハイドロフォン+3成分	ハイドロフォン+3成分、または3成分のみ	4.5Hz3成分速度計
総受振点数	224点	5点	12点	71点
記録系パラメータ				
探鉱器	GSX	OBX	OBS	GSX
サンプルレート	4ms	4ms	5msまたは10ms	4ms
記録長	60秒(含水爆薬)、15秒(エアガン)			

c) 海底地震計の設置

東海大学により海域測線上に約 1 km の間隔で 18 台の 3 成分+エアガン (一部) 地震計が設置され、このうち OBS1~6、OBS12~18 の記録が回収された。図 2 に各 OBS 位置を含めて表示した。(図 2、3.1.(2-3) 参照)

d) 含水爆薬による陸域発震

静岡側測線区間に 3 点、伊豆側測線区間に 1 点を選点し、予定位置において 60 m の発破坑を作坑した。発破日前日に 200 kg の含水爆薬を装填し、発破予定時刻を基準にして発破を実施した。各発震点に対し、独立型レコーダおよびラインナップ用受振器 4 点を発震点より約 50 m 離れた地点から約 25 m 間隔で設置し、ラインナップ観測を実施した。各受振器は発震点より巻尺を用いて距離を計測して設置し、携帯型 GPS により座標を測定した。レコーディングパラメータはサンプリング間隔 1 ms でゲインはなし、回収時まで連続記録を取得する設定とした。発震作業は 10 月 1 日未明に計画していたが、9 月 30 日の台風第 24 号の通過のため順延し、10 月 2 日未明および 10 月 2 日夜間の 2 回に分けて実施した。

発震諸元を以下に記す。

SP1 . . . 静岡県静岡市葵区崩野字奥ヒカケ

座標 : 北緯 35°07'42.89"、東経 138°12'03.67"
発震薬量 : 204.384 kg
坑底深度 : 60.7 m
薬長 : 36.8 m
薬頭深度 : 23.9 m
発震時刻 : 2018 年 10 月 2 日 23 時 32 分 10.999075 秒

SP2 . . . 静岡県静岡市葵区落合

座標 : 北緯 35°06'09.29"、東経 138°19'45.52"
発震薬量 : 204.384 kg
坑底深度 : 61.6 m
薬長 : 36.9 m
薬頭深度 : 24.7 m
発震時刻 : 2018 年 10 月 2 日 00 時 02 分 10.999076 秒

SP3 . . . 静岡県静岡市清水区吉原字大根山冷水

座標 : 北緯 35°05'21.55"、東経 138°26'15.94"
発震薬量 : 204.384 kg
坑底深度 : 61.0 m
薬長 : 37.8 m
薬頭深度 : 23.2 m
発震時刻 : 2018 年 10 月 2 日 03 時 07 分 11.499061 秒

SP4 . . . 静岡県伊豆市修善寺

座標 : 北緯 34°58'14.23"、東経 138°52'20.68"
発震薬量 : 204.384 kg
坑底深度 : 62.05 m
薬長 : 37.15 m
薬頭深度 : 24.0 m
発震時刻 : 2018 年 10 月 2 日 01 時 02 分 11.003081 秒

e) エアガン発震

東京海洋大学により実施された海域測線におけるエアガン発震について（3.1. (2-2) 参照）、本調査で展開した陸域受振点、浅海域受振点によりデータを取得した。エアガン震源は 1950 cu.inch の容量で、海域測線上 25 m 間隔で 788 点を 2 回、合計 1576 回、発震した。陸域および浅海域の受振点を展開した期間の、10 月 2 日および 10 月 3 日の夜間にエアガン発震を実施した。

f) 発震記録

各発破を陸域および浅海域受振点、OBS で観測した記録を図 3~5 に表示する。帯域通過フィルタを 2/3/5/8 Hz のパラメータで適用し、トレースごとに規格化して表示した。

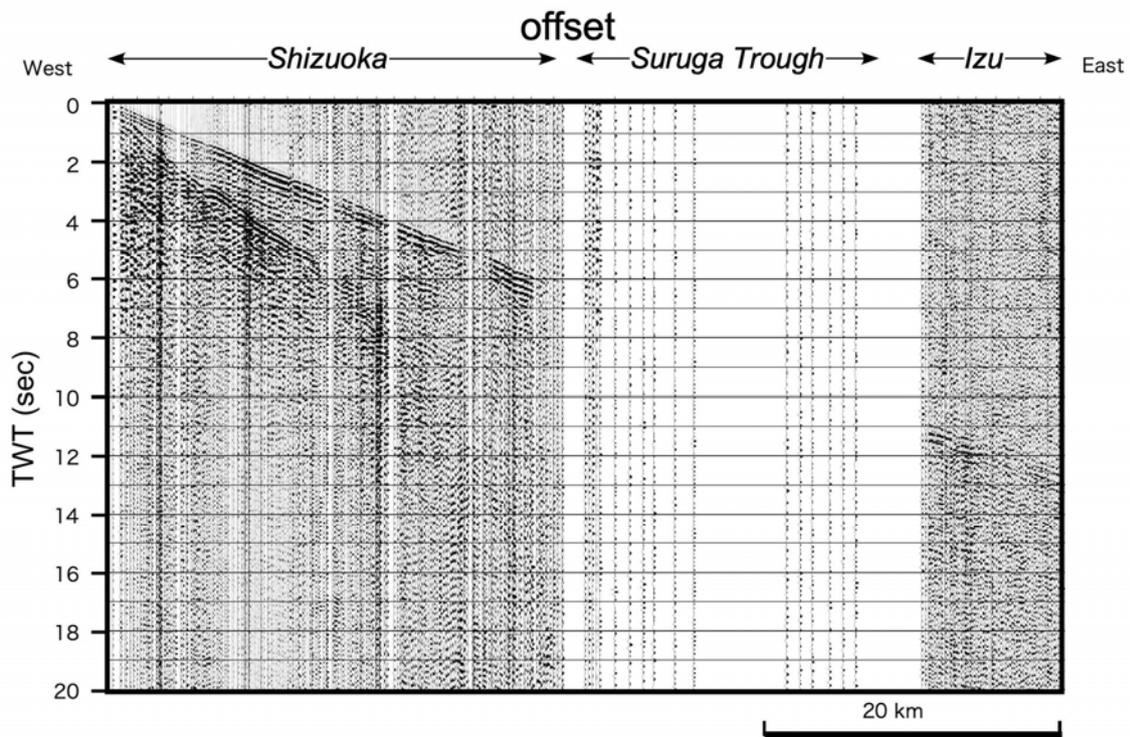


図 3 発破 SP1 の受振記録

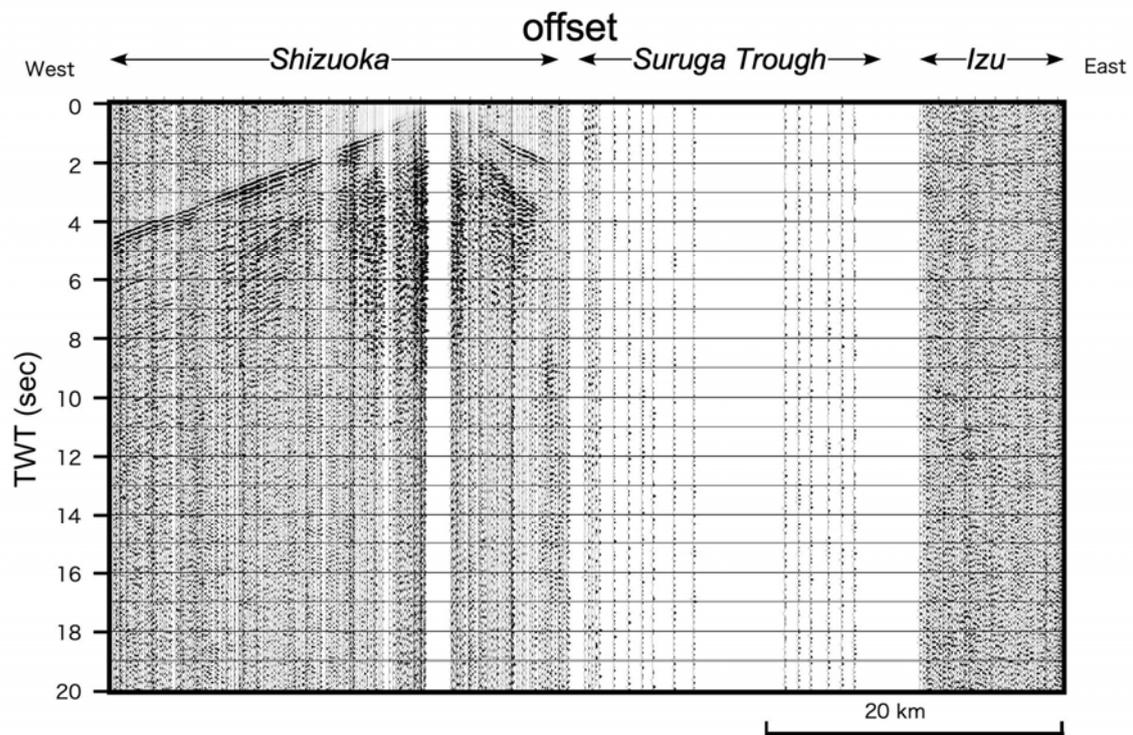


図 4 発破 SP3 の受振記録

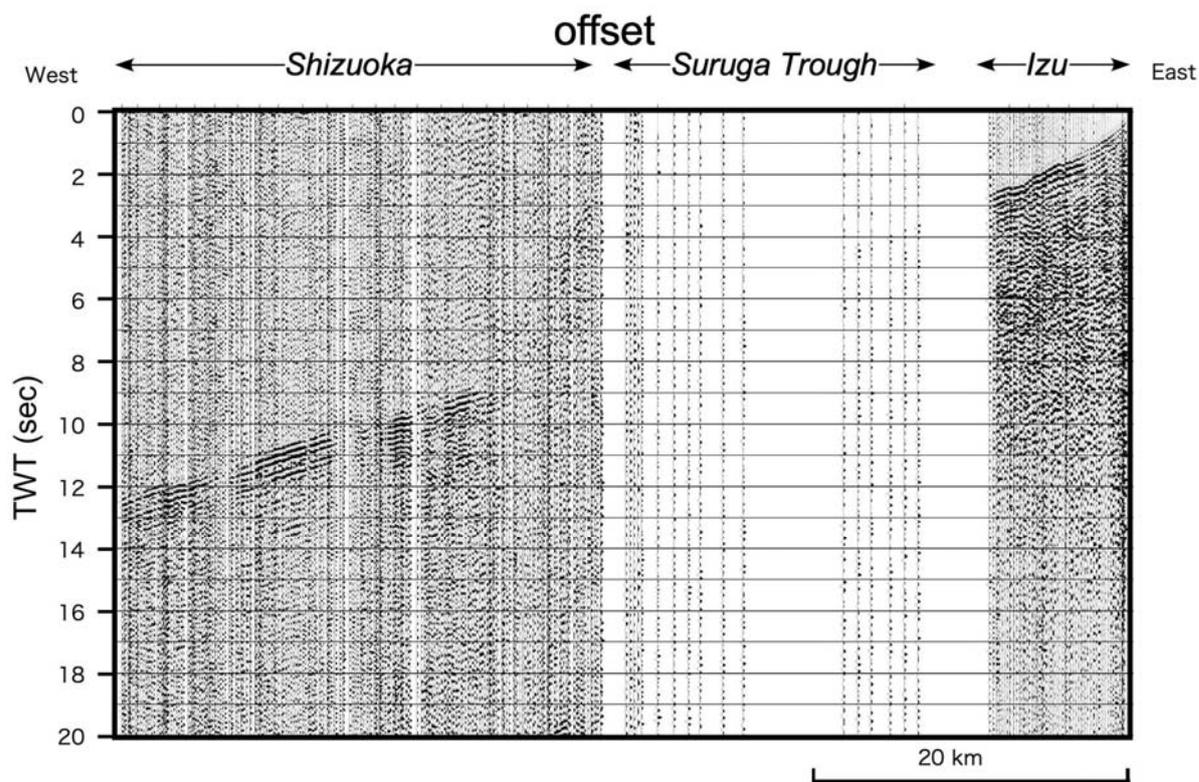


図 5 発破 SP4 の受振記録

エアガン発震のうち代表的な記録を陸域および浅海域受振点、海域受振点で観測した記録を図 6 に表示する。帯域通過フィルタを 2/3/5/8 Hz のパラメタで適用し、トレースごとに規格化して表示した。

一つの受振点に対する全てのエアガン発震記録を集めた共通受振点記録は、相反性により受振点位置で発震し、エアガン発震位置で受振した記録と同等となる。これより各発破点に対し、陸域受振点での記録とエアガン発震による発破点位置近傍の受振点の受振記録を統合して表示した発震受振統合発震記録を図 7～11 に示す。帯域通過フィルタは 2/3/10/12 Hz のパラメータで適用し、振幅補償を 5000 ms AGC で適用した。

OBS において取得された発破およびエアガン発震記録を用いて、上記と同様に、各 OBS 位置において発震受振統合記録を作成した図面を図 12・13 に示す。このとき一部については SN 比を向上させるために隣接するエアガン発震の記録を重合して表示した。

本波形表示において、陸域受振点で屈折波初動は明瞭に確認され、見掛け初動は静岡側浅部で 5 km/s 程度、伊豆側浅部で 2.5 km/s 程度、またオフセットの大きい深部屈折波で 6.5 km/s 程度が確認される。海域受振点の記録では海中を伝播する音波が卓越して見られ、繰り返し波が見られるなど SN 比が相対的に悪く確認が難しいが、屈折初動は連続して確認できる。海域から陸域へ音波が変換された波で被覆され、明瞭ではないが屈折初動の後続波として 6～8 秒前後に広角の反射波が見られる。

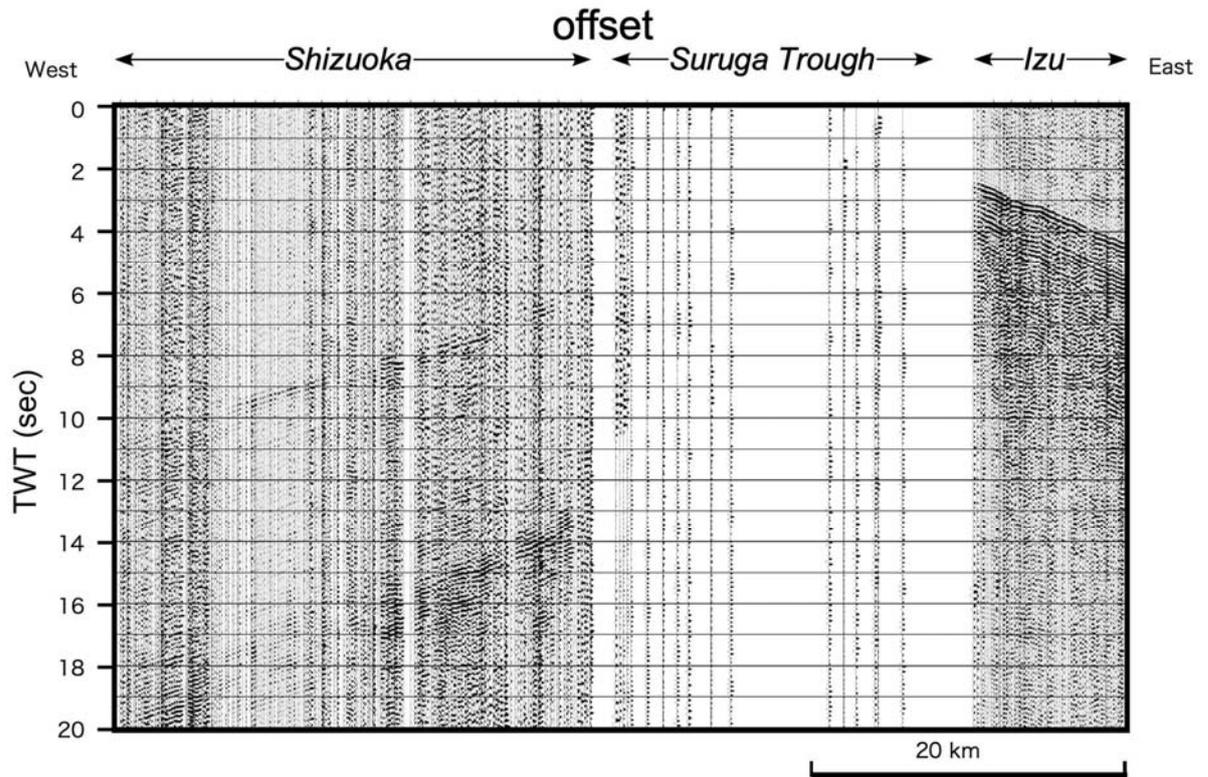


図 6 エアガン発震記録例(SP471, bp 2/3-5/8, tsgm)

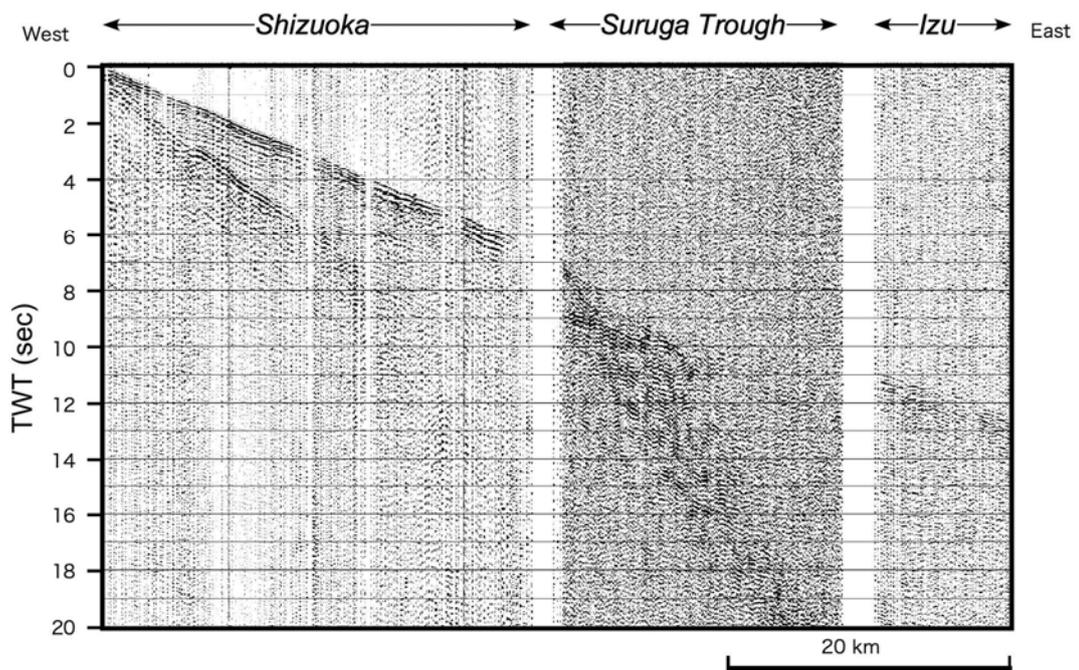


図 7 発震受振統合発震記録(SP1, bp 2/3-10/12, AGC5000ms, tsgm)

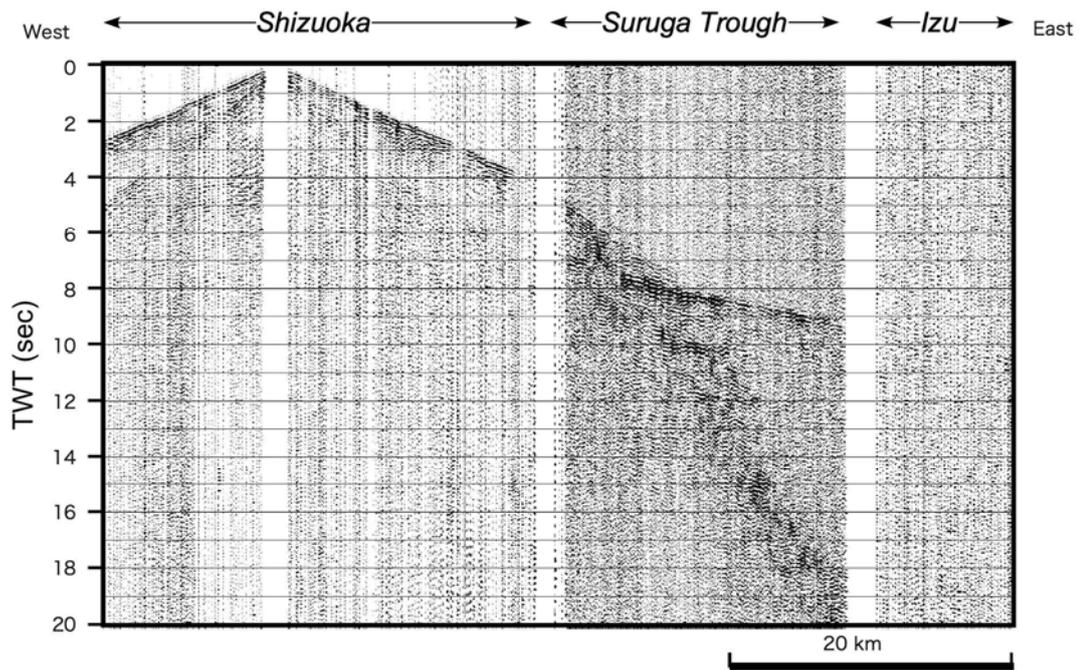


図 8 発震受振統合発震記録(SP2, bp 2/3-10/12, AGC5000ms, tsgm)

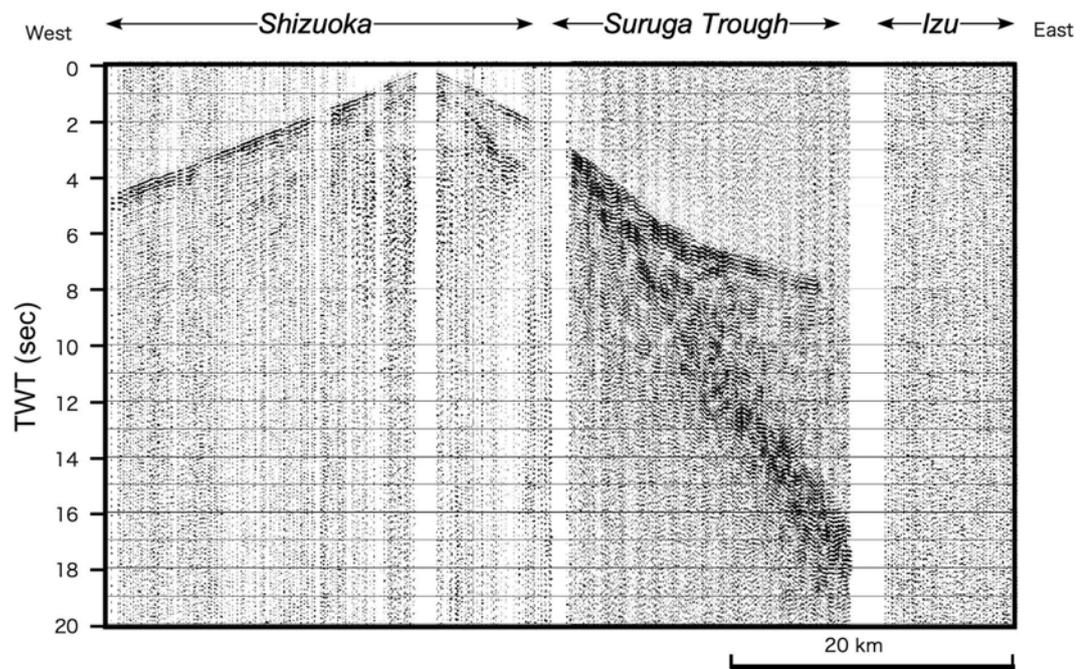


図 9 発震受振統合発震記録(SP3, bp 2/3-10/12, AGC5000ms, tsgm)

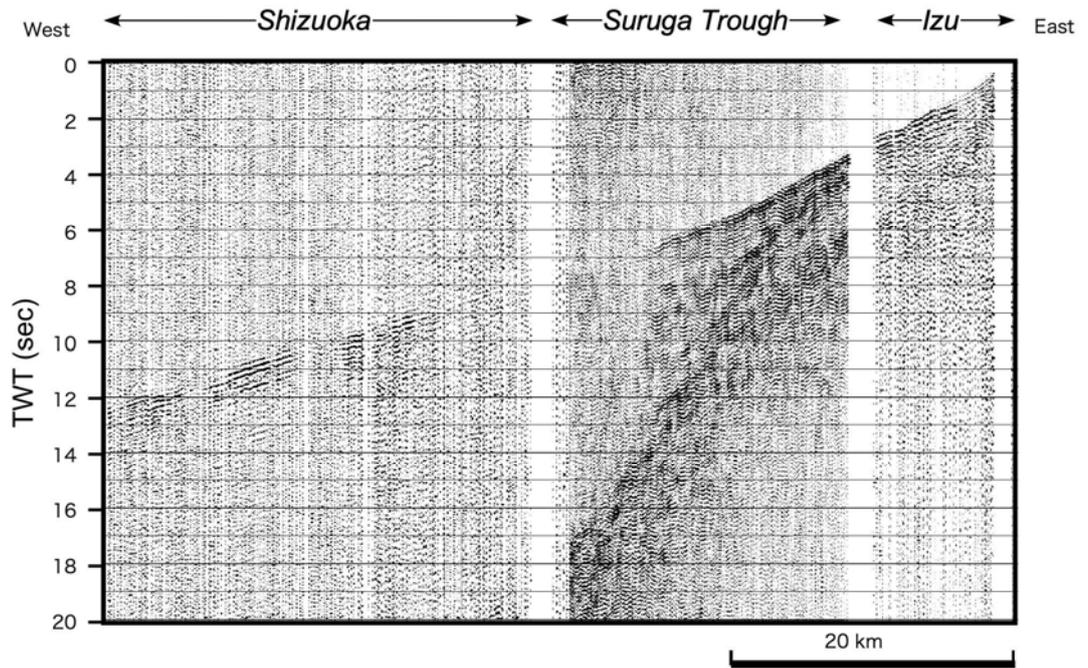


図 10 発震受振統合発震記録(SP4, bp 2/3-10/12, AGC5000ms, tsgm)

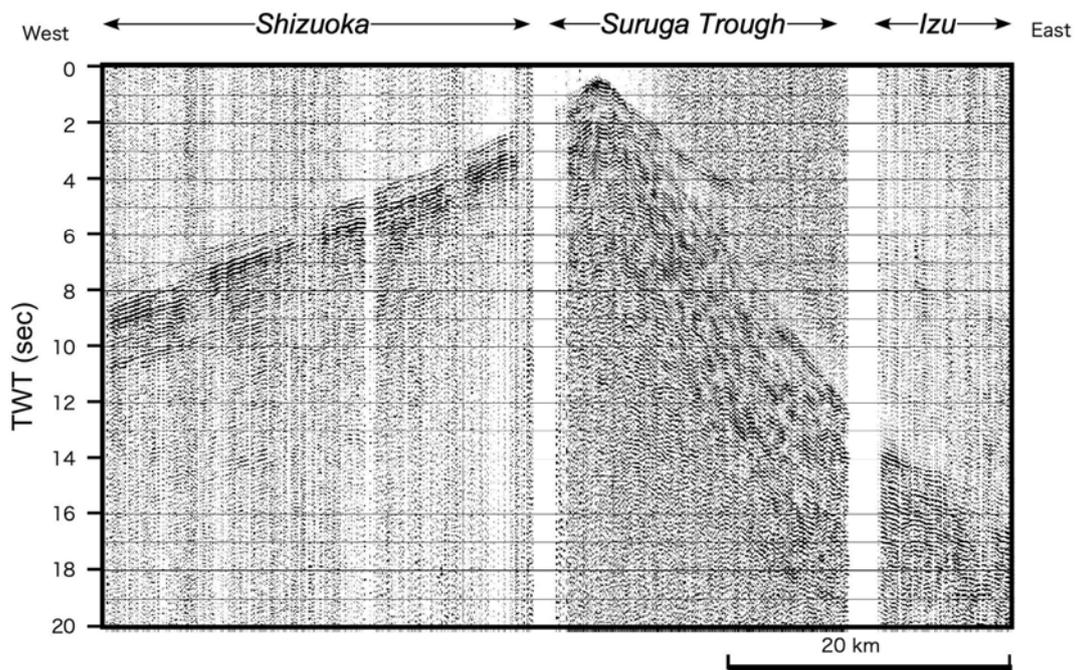


図 11 発震受振統合発震記録(OBS2, bp 2/3-5/8, tsgm)

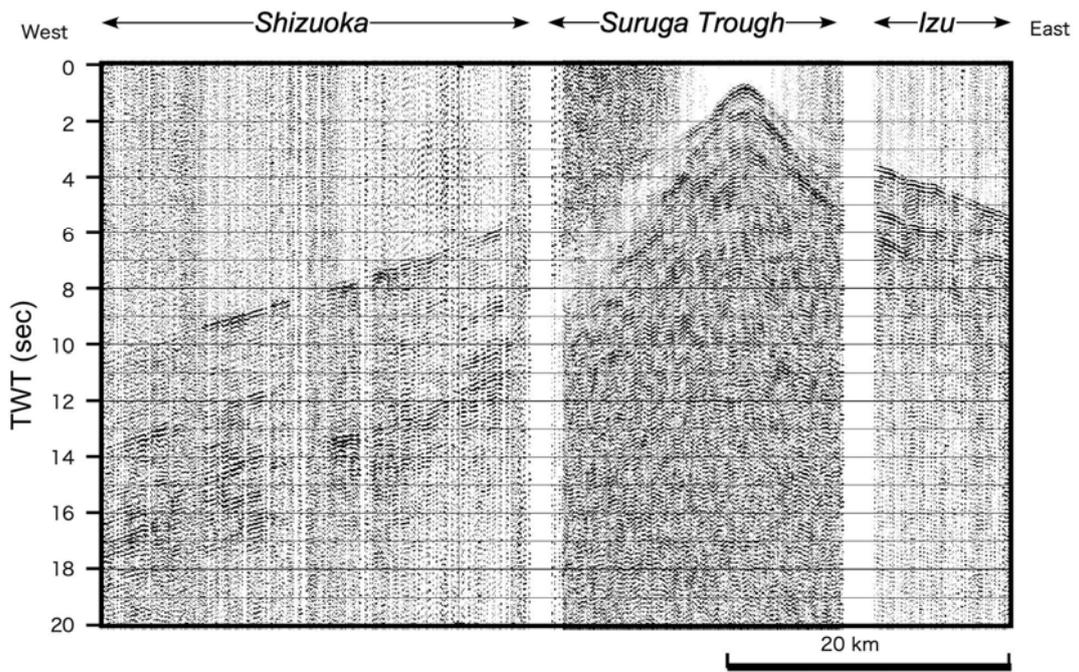


図 12 発震受振統合発震記録(OBS13, bp 2/3-5/8, tsgm)

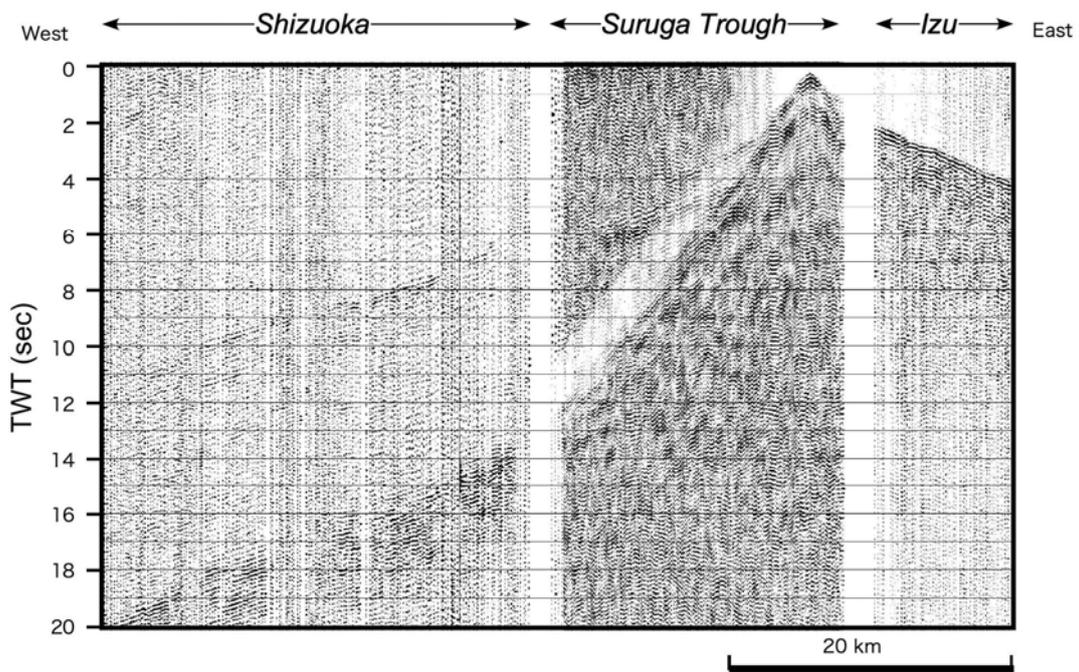


図 13 発震受振統合発震記録(OBS18, bp 2/3-5/8, tsgm)

3) データ処理・解析

a) 反射法データ解析

発破およびエアガン発震により陸域受振点、浅海域受振点、海域受振点で取得された記録を用いて、反射法解析を実施した。反射法処理のフローを図 14 に、解析に用いたパラメータを表 2 に示す。

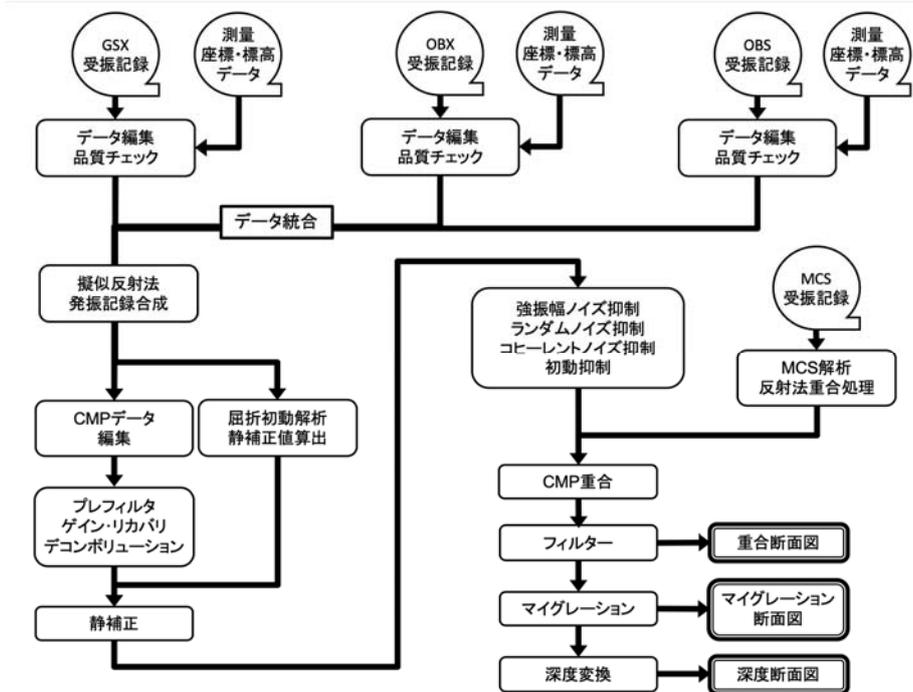


図 14 反射法データ処理ワークフロー

b) 反射法処理フロー

(i) フォーマット変換およびデータ編集 (Format Conversion and Trace Edit)

フィールドユニットに記録された原記録 (Original Format) について、SuperX (JGI Internal Format) フォーマットへ変換を行った。各発破およびエアガン発震の時刻を基準として 22 秒間のデータに切り出した。GSX 記録に関しては上下動の記録を用いた。OBX 記録に関しては記録された方位および傾斜の情報から上下、東西、南北成分に回転し、このうち上下動の記録を用いた。OBS 記録に関しては東海大学より提供された上下動成分を用いた。

(ii) トレースヘッダーへの測線情報の入力 (Geometry Application)

SuperX トレースヘッダーに関して、発震点、受振点及び各 CMP のインデックス、座標、標高値、オフセット距離、基準面標高値等の測線情報を入力した。データ解析における基準標高面は平均海面位置に設定した。また、CMP 重合測線は下記の基準によって決定した。

CMP 間隔.....	100.0 m
CMP 範囲.....	1 ~ 642
重合測線からの最大偏倚制限.....	なし

表 2 解析パラメーター一覧

	処理項目	パラメータ項目	パラメータ
1	フォーマット変換		OriginalフォーマットからSUPERXフォーマットへ変換
2	測線情報セット		
3	最小位相変換	ターゲット	エアガンデータ
4	屈折初動解析		
5	静補正	手法 インバージョン 発震点における表層速度 受振点における表層速度 表層基底層速度 標高補正速度	屈折法解析 タイムターム法 1800 m/sec 1800 m/sec 3000 m/sec 表層基底層速度
6	ノイズ抑制(ランダムノイズ抑制)	オペレータ長 ゲート長 時間ゲート長 オペレータタイプ 時間ゲートオーバーラップ長	7 CMPs 49 CMPs 500 msec Two-Side 375 msec
7	ノイズ抑制(線形ノイズ抑制)	処理領域 オペレータモード オペレータ長 速度範囲 ターゲット周波数 前処理 AGCゲート長	共通発震点領域 reject 11 traces -3000 ~ 3500 m/sec 0/2 ~ 80/90 Hz 静補正処理、NMO補正、AGC適用 300 msec
8	振幅補償	手法 AGCゲート長 ゲートスライディング速度	AGC 5000 msec 5000 m/sec
9	デコンボリューション	手法 モード ゲートスタートタイム ゲート長 オーバーラップ長 オペレータ長 予測距離 ゲートスライディング速度 ホワイトノイズ	予測型デコンボリューション Non Time Variant 250 msec 3000 msec - 500 msec 48 msec 5000 m/sec 0.5%
10	CMPデータ編集	ピンサイズ CMP制限	100 m none
11	NMO補正	ストレッチファクター	1.8
12	CDP重合	手法 振幅調整	CMP重合法 重合数の平方根
13	重合後デコンボリューション	手法 モード ゲートスタートタイム ゲート長 オーバーラップ長 オペレータ長 予測距離 ゲートスライディング速度 ホワイトノイズ	予測型デコンボリューション Automatic Time Variant 2000 msec 4000 msec - 640 msec 32 msec 5000 m/sec 1.0%
14	周波数-空間予測フィルタ	オペレータ長 ゲート長 時間ゲート長 オペレータタイプ 時間ゲートオーバーラップ長	7 CMPs 49 CMPs 500 msec Two-Side 375 msec
15	バンドパスフィルター	オペレータ長 通過帯域(0-1000ms) (1000-2000ms) (2000-4500ms) (4500-20000ms)	600 msec 10/10 - 80/80 Hz 8/8 - 40/40 Hz 6/6 - 20/20 Hz 2/3 - 10/12 Hz
16	マイグレーション	手法 最大傾斜角 サンプリング間隔 速度タイプ	差分法時間マイグレーション 15 degree 4 msec スムージング速度
17	深度変換	基準面	平均海水面

(iii) 屈折波初動解析(Refraction Analysis)

改良型タイムターム法による屈折初動解析を行い、受振点及び発震点タイムターム値と表層基底層速度を算出した。この手法では解析対象とする屈折面が2次元ブロックに分割され、各ブロックに対して表層基底層速度が定義される。このモデルは以下の関係式で記述される。

$$T_{ij} - \sum_k s_{k,0} \Delta_{ijk} = a_i + b_j + \sum_k \delta s_k \Delta_{ijk} \tag{1}$$

ここに、 T_{ij} は屈折初動走時、 a_i, b_j は発震点及び受振点タイムターム、 $s_{k,0}, \delta s_k, \Delta_{ijk}$ は各ブロックにおけるスローネス初期値、スローネスの初期値からの偏倚量及び屈折波線長である。この受振点及び発震点タイムターム値と表層基底層速度はインバージョン(Generalized Linear Inverse Method)によって算出される。改良型タイムターム法解析の結果を用いて、表層基底層速度は各発震点及び各受振点について以下の様に計算される。

$$D_w = \frac{T_m}{\sqrt{1 - \left(\frac{V_w}{V_{sw}}\right)^2}} \cdot V_w \tag{2}$$

ここに、 T_m は'Time-Term'、 V_w は表層速度、 V_{sw} は表層基底層速度である。

(iv) 最小位相変換 (Minimum Phase Conversion)

エアガン発震記録については、ガン構成およびガン深度より合成したエアガン震源波形を用いて、最小位相変換処理を適用した。

以降のノイズ抑制処理の適用を検討するため、発震受振統合発震データに対し以上の処理を適用し、共通反射点編集後に各発震点の midpoint までの CDP 範囲で単一の統合発震点データを表示した 100 %断面を図 15 に示す。

(v) ランダムノイズ抑制処理(Random Noise Attenuation)

発震記録上に見られるランダムノイズを抑制し、S/N を向上させるために周波数-時間領域(F-X)予測フィルタを適用した。本手法では、周波数-空間領域において複素型予測フィルタが設計・適用される。適用する際には一時的処理として、浮動基準面に対する静補正、AGC スケーリング、NMO 補正を適用している。

- オペレータ長..... 7 traces
- 空間ウィンドウ長..... 49 traces
- 時間ウィンドウ長..... 500 msec
- 適用領域..... 共通発震記録

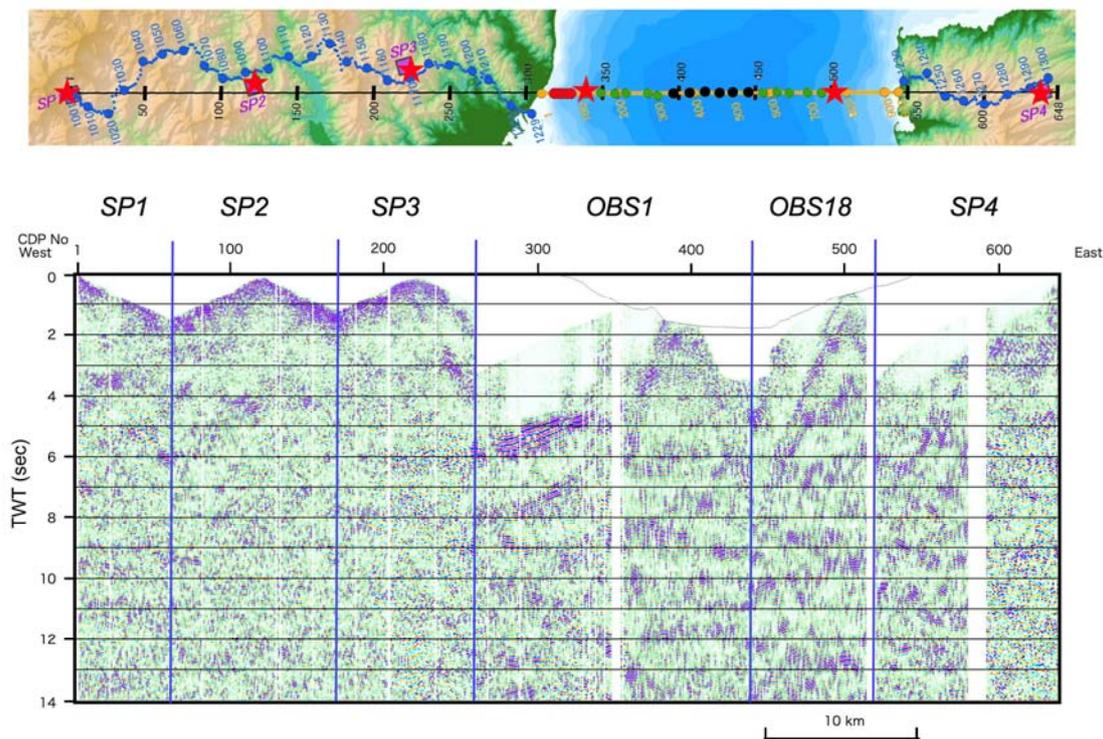


図 15 発震受振統合記録による 100 %時間断面図(青線は各発震による CDP 範囲)。測線図の凡例は、図 2 参照。●は記録が使用不能となった OBS の設置地点。

(vi) 線形ノイズ抑制処理 (F-X Velocity Filter)

表面波に代表されるコヒーレントノイズを抑制するために周波数-空間領域で速度フィルタを適用した。本処理内において NMO 補正および AGC を適用し、共通受振点領域に対して処理を行った。

- オペレータ長..... 11 traces
- 抑制処理を行う周波数..... 0/2~80/90 Hz
- 除去速度帯域..... 0/0~3000/3500 m/sec
- 適用領域..... 共通発震記録

(vii) 初動ミュート (First-break Suppression)

強振幅の屈折波初動およびその繰り返しを抑制する目的で、初動抑制処理を実施した。処理においては、後述する屈折法解析に向けて読み取った屈折初動走時を参照して、それに平行する波群を抽出し、原記録から減算した。

(viii) 共通反射点編集 (Common Midpoint Sorting)

上述(2)のパラメータによって、共通反射点の編集を実施した。

(ix) 浮動基準面に対する静補正 (Static Corrections to FDP)

浮動基準面に対する静補正を実施した。静補正については、下式で定義される標高補正量及び表層補正量の和として各発震点、受振点について与えられる。

[A] 標高補正 T_e : 観測面を一定基準面へ補正する。

$$T_e = - (H_e - H_b) / V_{ec}$$

[B] 表層補正 T_w : 低速度の表層構造変化による影響を除去する。

$$T_w = S_d * (-1/V_w + 1/V_{sw})$$

ここに、 H_e : 発震点あるいは受振点標高(m)

H_b : 基準面 [海拔 * m]

S_d : 表層厚(m)

V_w : 表層速度(m/s)

V_{sw} : 表層基底層速度(m/s)

V_{ec} : 標高補正速度(1800 m/s)

である。本処理では標高補正速度(V_{ec})として下記の基準面補正速度(V_c)と同じ値を用いた。

表層補正值は、前述(3)の屈折波初動解析による結果を用いて計算された。本測線の基準面(Datum)は平均海水面位置に設定された。絶対値の大きい標高補正值の適用を回避するため、CDPに近接する受振点標高を基に長波長成分を抽出してCMPアンサンブル上において平均標高を定義し、これを浮動基準面 (FDP:Floating Datum Plane) とした。この FDP から基準面までの基準面補正量 T_d は、下記のように定義される。

$$T_d = -2.0 * (H_f - H_b) / V_c$$

ここに、

H_f : 浮動基準面 (FDP)

V_c : 基準面補正速度 (1800 m/sec)

である。この FDP の計算には CMP に近接する受振点の標高値を参照した。

(x) 振幅補償 (Gain Recovery)

弾性波の震源からの伝播に伴う幾何減衰、多層構造内を透過、多重反射することによる伝播損失及び非弾性効果による減衰、さらには受振点、発震点毎のカップリングの相異に起因する振幅特性の変化を補償することを目的として、自動振幅調整による振幅補償を行った。

(xi) デコンボリューション (Deconvolution)

震源波形、地層効果、記録系の集積としての基本波形を地震トレースから推定・除去し、記録の分解能向上を図るためにデコンボリューションを適用した。

予測距離 : 48 ms

設計ゲート長 : 3000 ms

オペレータ長 : 500 ms

プリホワイトニングファクター : 1.0 %

ゲートタイプ : Automatic-tv

アルゴリズム : Predictive Deconvolution

(xii) NMO 補正 (Normal Moveout Corrections)

後述の屈折法解析により求められた区間速度を用いて、重合速度-時間の関数に変換し時間-空間方向に内挿した速度テーブルに従って NMO 補正を適用した。

(xiii) 重合前振幅調整 (Amplitude Conditioning before Stacking)

トレース間の振幅バランスを調整するため、自動振幅調整による振幅補償を行った。

(xiv) 共通反射点重合処理 (CMP Stacking)

NMO 補正及び残差静補正適用後の共通反射点アンサンブルに関して水平重合処理を実施した。

(xv) 重合後デコンボリューション(Deconvolution)

重合後断面に見られる多重反射ノイズの抑制を目的として、予測型デコンボリューションを適用した。

予測距離 : 32 ms
設計ゲート長 : 4000 ms
オペレータ長 : 640 ms
プリホワイトニングファクター : 1.0 %
ゲートタイプ : Automatic-tv
アルゴリズム : Predictive Deconvolution

(xvi) 基準面補正 (Datum Corrections)

浮動基準面から基準面への時間補正を適用した。

(xvii) 周波数-空間領域予測フィルタ (F-X Prediction Filter)

周波数-空間領域において複素型予測フィルタを設計・適用してランダムノイズを抑制し相対的に S/N を向上させる F-X 予測フィルタ処理を実施した。

オペレータ長..... 7 traces
空間ウィンドウ長..... 49 traces
時間ウィンドウ長..... 500 msec
適用領域..... 重合後記録

(xviii) 重合後時間マイグレーション (Post-Stack Time Migration)

時間断面上の反射点位置を実際の位置に移動させ、回折波を回折点に復元することを目的として、時間-空間座標領域における差分法時間マイグレーション(15°近似)を実施した。マイグレーション速度には時間及び空間方向に平滑化および 60 %のスケールリングを施した重合速度を用いた。また、標高変化を伴うデータに対し、基準面 (Datum) から浮動基準面 (FDP) までの区間を零速度層によって充填する手法を採用した。

(xix) 時間-空間可変帯域通過フィルタ (Space-Time Variant Band Pass Filter)

反射波の有効周波数帯域が周波数成分解析によって決定され、時間-空間可変の零位相

帯域通過フィルタを適用した。

通過帯域： 10/10 – 80/80 Hz (0-1000 ms)
8/8 – 40/40 Hz (1000-2000 ms)
6/6 – 20/20 Hz (2000-4500 ms)
2/3 – 10/12 Hz (4500-20000 ms)

以上の処理ステップを逐次経ることによって、図 16 の CMP 重合処理断面図を得た。

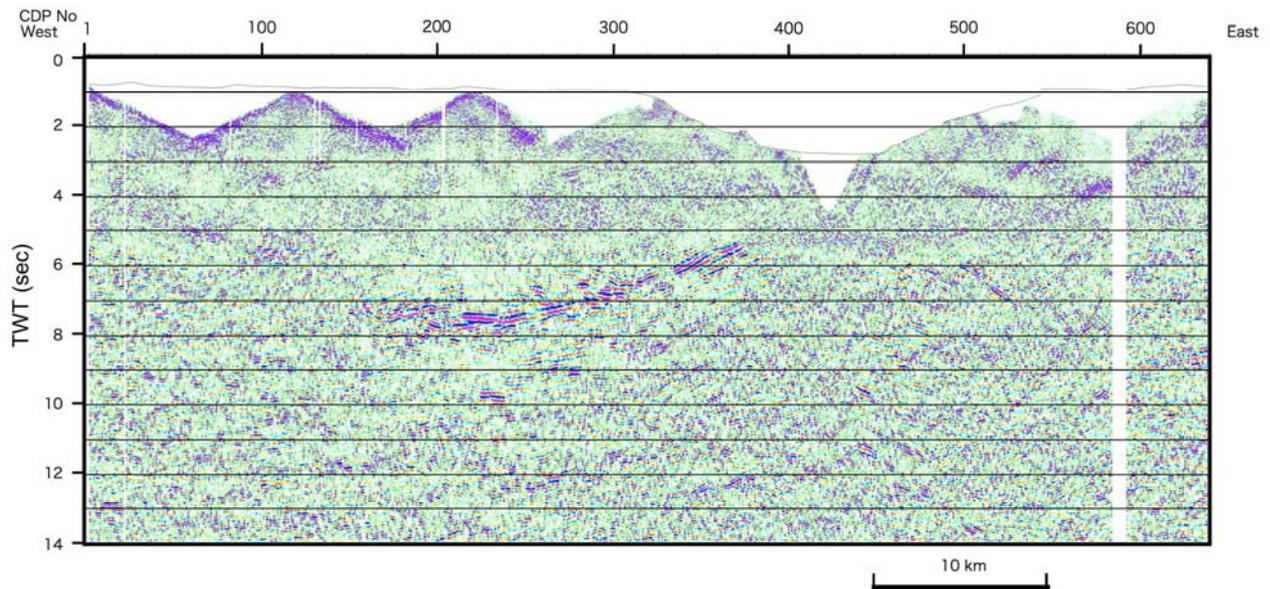


図 16 CMP 重合時間断面図

c) 地震波干渉法による擬似発震点合成

海底受振計 OBS の欠損部を補い、リデータミングを施すことを目的として、地震波干渉法を用いた疑似発震記録を合成し、反射法解析記録に統合した。

地震波干渉法は、異なる受振点で観測された地震波形の干渉処理（コリレーション型、またはデコンボリューション型）により、ある受振点位置を仮想的な振源とする地震波形を合成するデータ処理技術である。図 17 は、地中のある振源に対して地表の異なる受振点で観測を行った場合の地震波干渉法の概念図である。振源から点 B に到達した波（走時 t_a ）とその波が地表面で反射し地中を伝播して点 A に到達した反射波（走時 t_b ）について相互相関を計算することにより、走時 $t_a - t_b$ に点 B を振源として点 A で観測される反射波が合成される。この操作を複数の自然地震や常時微動に対して実施し、重合することによって、各合成波形の S/N を向上させる処理を実施する。

地震波相互干渉による仮想振源記録は、トレース間のコリレーション処理またはデコンボリューション処理により合成できる。コリレーション型は安定した計算が期待できる。一方、デコンボリューション型は震源スペクトルを必要としないため自然地震や爆破記録へ適している。本解析においてはデコンボリューション型を採用し、オペレータ長は 120 msec とした。

地震波干渉法においては、受振点を m 点設置した場合、全ての受振点の位置が仮想的

な発震点または受振点となるので $m \times m$ 組の新たな波形記録を合成することができる。これは、本手法の重要な特徴の一つであり、受振器アレイ展開による爆破振源記録に対して適用した場合、合成される記録は固定展開による反射法地震探査の記録に相当する。従って、その合成された仮想振源記録に対しては、通常の反射法地震探査処理に用いられる CMP 重合法のような標準的な処理プロセスを適用することが可能となる。

本解析のエアガン発震データに関しては、全ての発震点位置が仮想的な受振点位置となるため、各 OBS 位置の記録からその直上の発震点位置へとリデータミングされ、欠損した OBS 位置において合成することが可能となる。

この処理によって得られた合成記録を統合し、得られた重合断面を図 18 に示す。

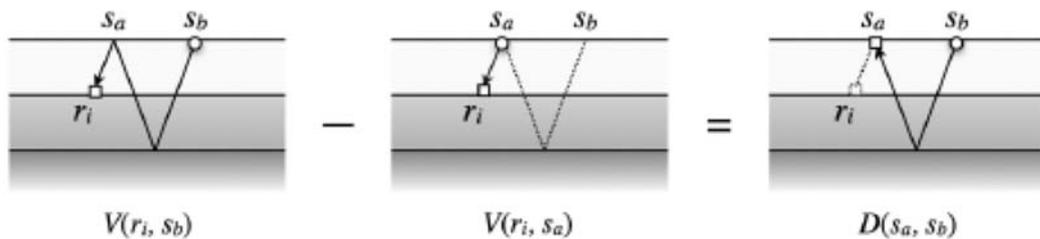


図 17 エアガン-OBS データの干渉法によるリデータミングの概念図 (Shiraishi et al., 2017)。

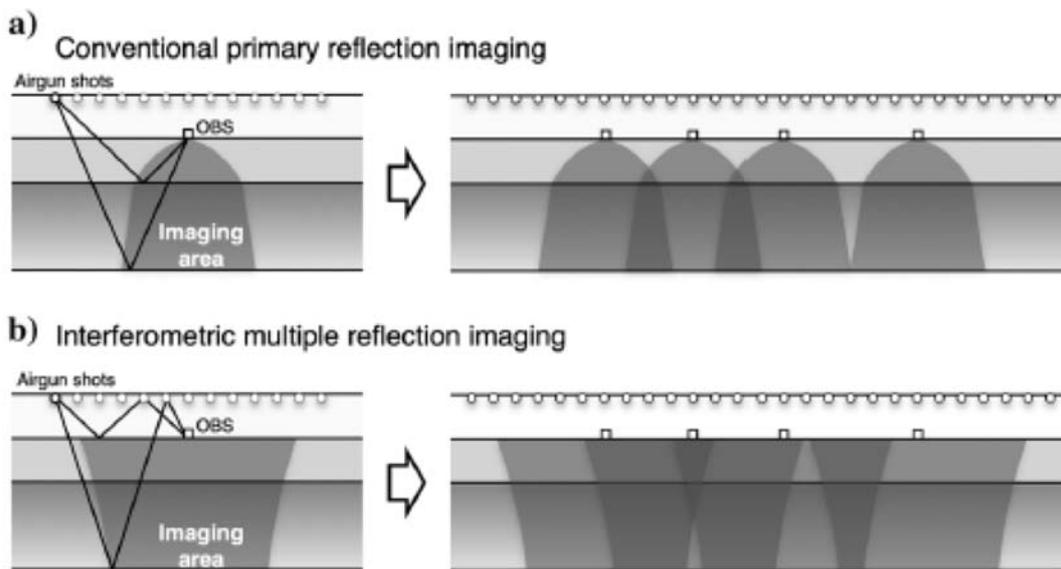


図 18 OBS データの干渉法イメージングの概念図(Shiraishi et al., 2017)。

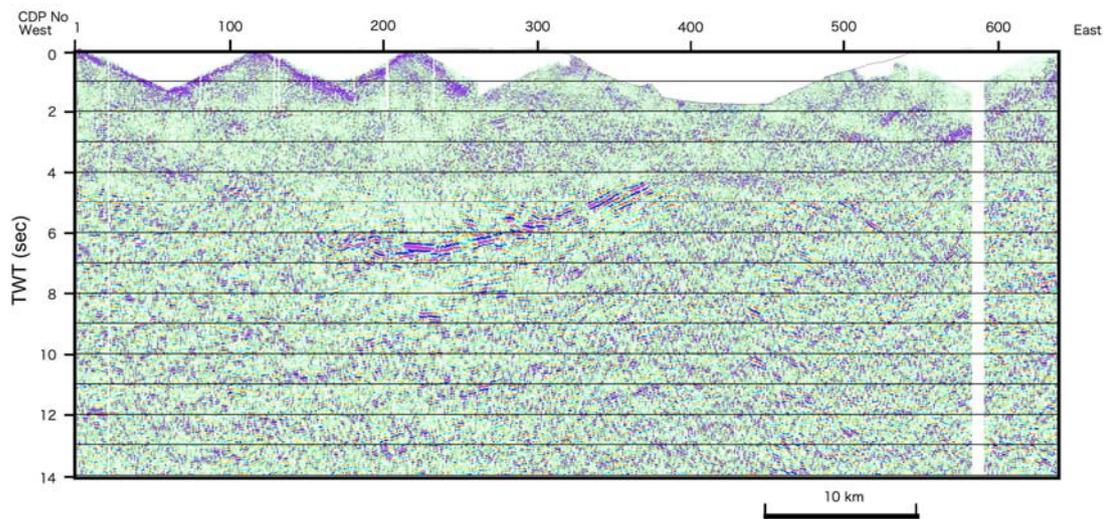


図 19 擬似発震点統合重合時間断面図

d) ストリーマ調査データとの統合解析

東京海洋大学により海域測線上のエアガン発震点と同一の発震点においてエアガン発震を実施し、600 m のストリーマを曳航して 96 ch の受振器による観測が実施された ((2-2)参照)。ノイズ抑制処理を含む基本的な反射法解析を施した。得られた重合前記録を用いて、本解析の CDP 間隔に合わせて再編集し、反射法・擬似発震点重合・ストリーマ解析の統合データを得た。

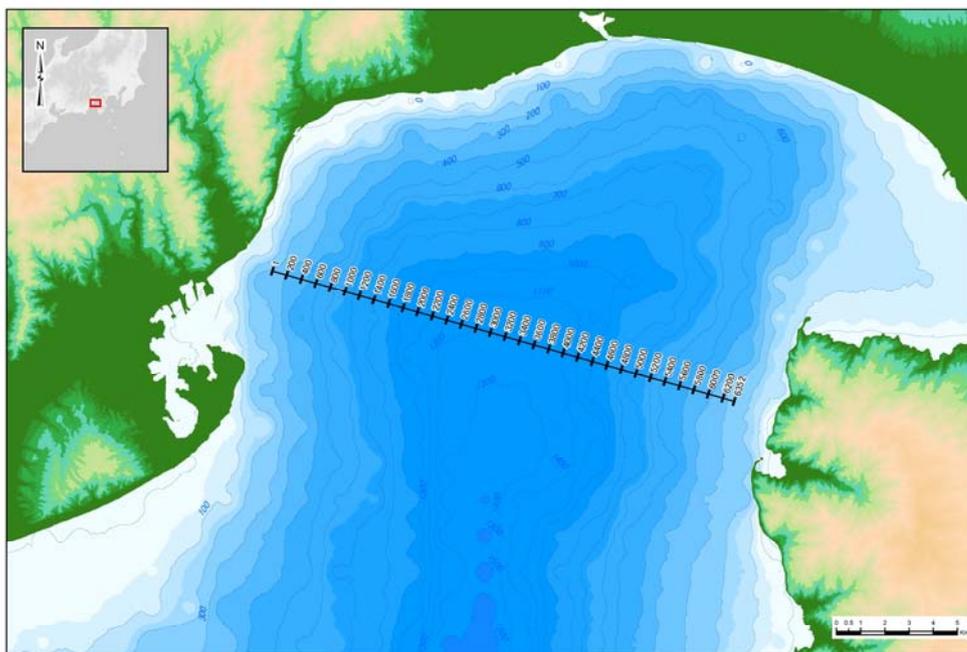


図 20 ストリーマ調査重合測線図。数字は CDP 番号。

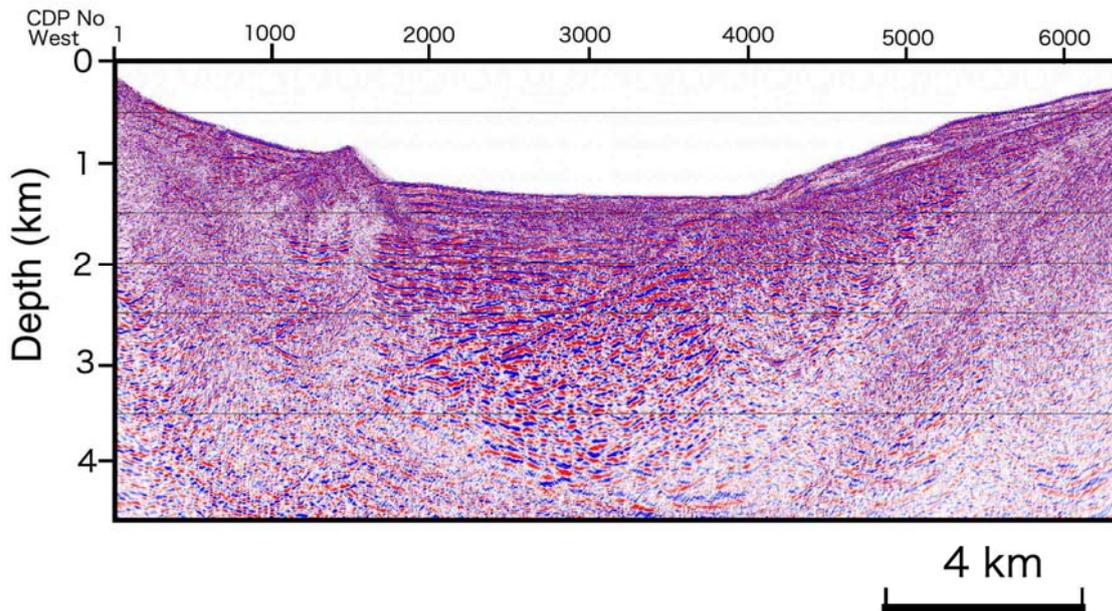


図 21 ストリーマケーブルにより取得された反射法地震探査深度変換断面。

これらのストリーマケーブルのデータを統合し、マイグレーション処理を施した CMP 重合処理断面図が得られた（図 22）。

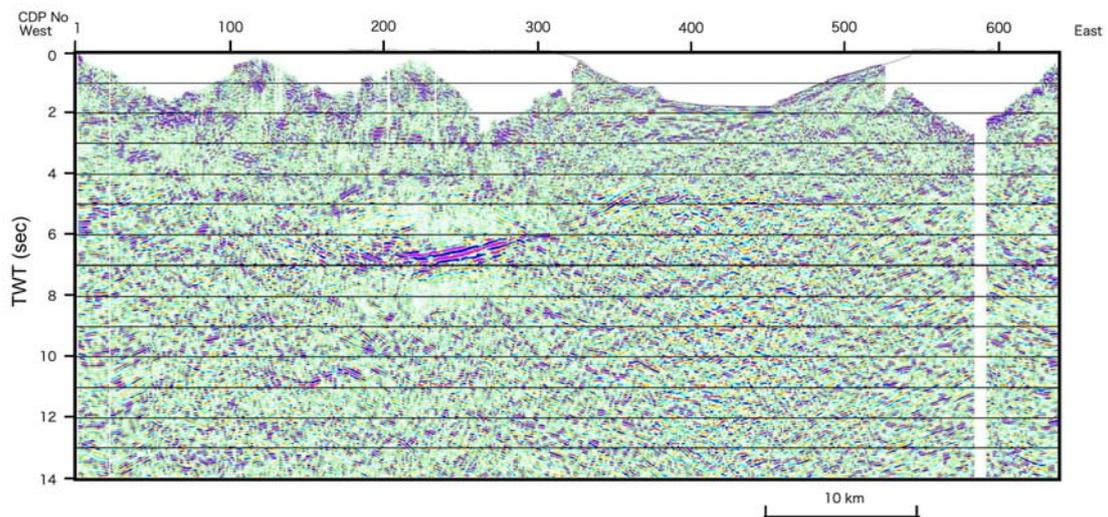


図 22 ストリーマデータ統合重合後マイグレーション時間断面図

e) 屈折法データ解析

発破による陸域受振点および浅海域・海域受振点による観測記録、またエアガン発震による記録を用いて初動読み取りを実施し、トモグラフィ解析を実施した。トモグラフィ解析のフローを図 23 に、パラメータを表 3 に示す。

(i) トモグラフィ解析の概要

トモグラフィックインバージョンにおける理論走時のフォワードモデリングには、Linear Traveltime Interpolation 法(LTI 法, Asakawa and Kawanaka, 1993)を用いた。波線の計算では対象の領域を格子に分割し、各格子を通る波線を求める。LTI 法は各格子をさらに細かく分割し、隣接する格子上の各分割点を結ぶ波線の走時を計算した後、得られた走時の組を用いて走時が最小になるよう波線を補間する。格子のサイズ・分割点にかかわらず走時が最小になる波線経路を計算することにより、他の走時計算法と比較して正確さと安定性に利点を持つ。

インバージョンのアルゴリズムには基本的に、Simultaneous Iterative Reconstruction Technique(SIRT 法)を用いた。トモグラフィックインバージョンでは一般に、格子に分割された領域に対し波線経路に沿った格子上に走時の観測値と計算値の差を速度の修正値として割り振り、波線計算と速度修正値の決定の反復計算をする Algebraic Reconstruction Technique(ART 法)によるインバージョンを行う。通常の ART 法では各格子上で波線ごとに計算した速度の修正値をそれぞれ逐次的に適用するが、SIRT 法では全波線で計算した速度の修正値の平均を取った値による修正を適用する。さらに本解析に用いる SIRT 法では、速度の修正値の計算において各格子内を波線が通過する時間により残差走時を比例配分する改良を施してある。また波線周辺の格子を波線からの距離に応じた重みをつけて更新対象にすることで、計算の安定化を図っている。

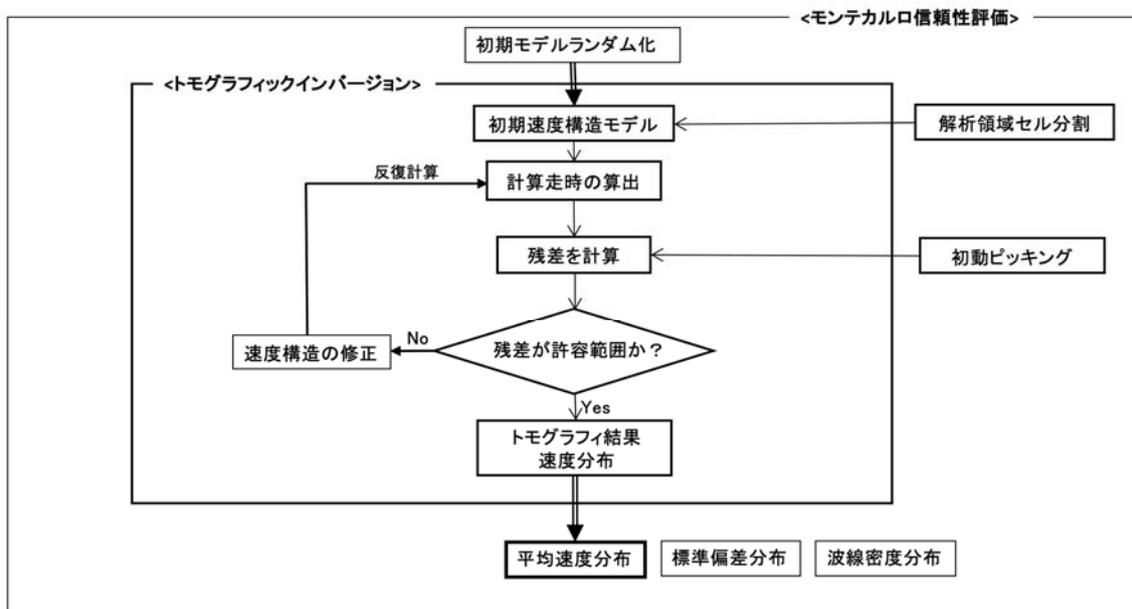


図 23 トモグラフィ解析のフロー。

表 3 屈折トモグラフィ解析のパラメータ一覧

	処理項目	パラメータ項目	パラメータ
5	投影測線	投影法 原点 終点 受振点における表層速度 表層基底層速度 標高補正速度	2次元直線投影 SP1位置 SP4位置 2000 m/sec 3000 m/sec 表層基底層速度
6	初期モデル	手法 速度構造 初期モデル数 速度範囲	モンテカルロ法ランダム初期モデル 1次元線形勾配モデル 100 1000~4000m/s(地表) 3000~6000ms/(深度3000m)
7	トモグラフィ解析	走時計算手法 インバージョン手法 グリッドサイズ グリッド数 スムージング 有効波線距離 イタレーション回数	LTI SIRT 100m(水平) x 100m(鉛直) 648(水平) x 300(鉛直) 21(水平) x 11(鉛直) 1600m 10
8	最終速度モデル	手法	100パターンモデル平均

インバージョンの信頼性評価として、初期モデルランダム化によるモンテカルロ不確実性解析(白石・他, 2010)を行った。ランダムに生成した多数の初期モデルに対してトモグラフィ解析を実施し、全ての結果を平均した速度分布および平均値からのばらつきを示す標準偏差分布を得る。これら二つの情報はそれぞれ、トモグラフィ解析による速度構造モデル解とその確からしさの指標として提供できる。

(ii) トモグラフィ解析の条件

各発震に対する初動の読み取りを実施した。速度構造の計算領域は発震点・受振点を含む2次元断面において、水平方向には重合測線上 SP1 と SP4 を結ぶ直線 6480 m、鉛直方向には標高 1 km から深さ 29 km までの 30 km とした。メッシュサイズは水平方向に 100 m、鉛直方向に 100 m とした。また速度の修正における更新対象格子の範囲は、波線から 1600 m までの距離とした。

初期速度構造モデルは、ランダムな条件での 100 ケースについて構築し、各々についてトモグラフィックインバージョンを行った。初期速度構造モデルの生成条件は、一定速度勾配の速度範囲として、地表面で 1000~4000 m/s、深度 3000m で 3000~6000 m/s をランダムに選択した。

構築した異なる初期構造モデルに対して、それぞれ反復回数 10 回とした。反復回数の設定においては、観測走時と計算走時の残差に十分な収束が得られる値を選択した。

(iii) トモグラフィ解析結果

100 ケースの初期速度構造モデルから得られた結果の平均をとって、トモグラフィックインバージョンによる最終的な速度分布とした(図 24)。得られた最終的な速度分布および各トモグラフィックインバージョン結果から計算される標準偏差分布・平均波線密度を図 25、26 に示す。速度分布・標準偏差分布においては、波線密度が 1 より大きな値を持つ格子の結果のみ有効であるとみなし、その他の格子は NAN 値でマスクすることにより表示している。

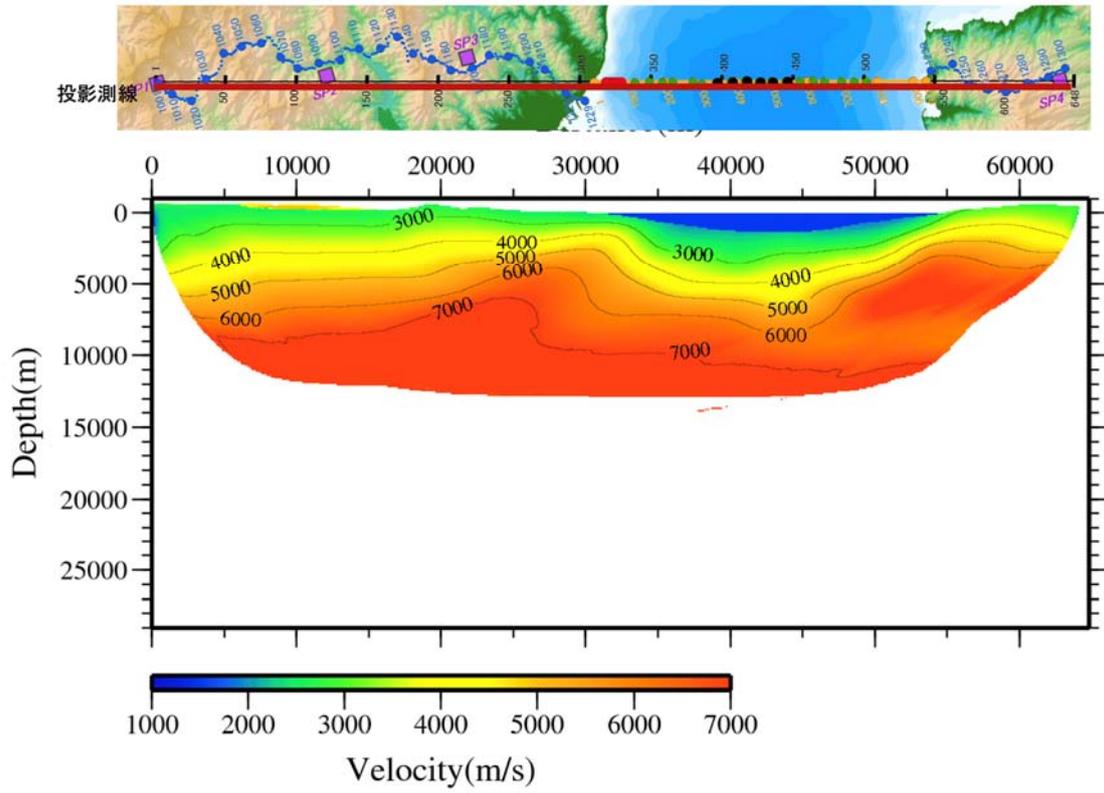


図 24 屈折トモグラフィ解析結果（速度分布）。

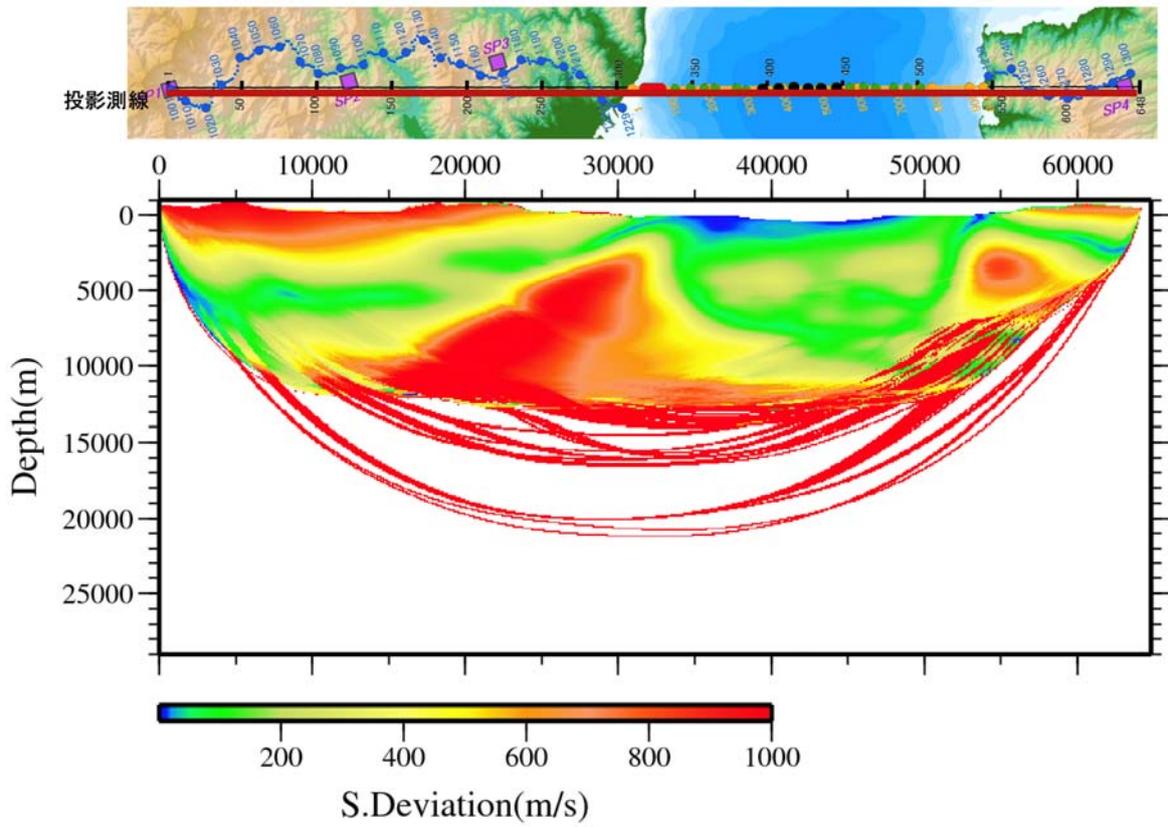


図 25 屈折トモグラフィ解析結果（標準偏差）。

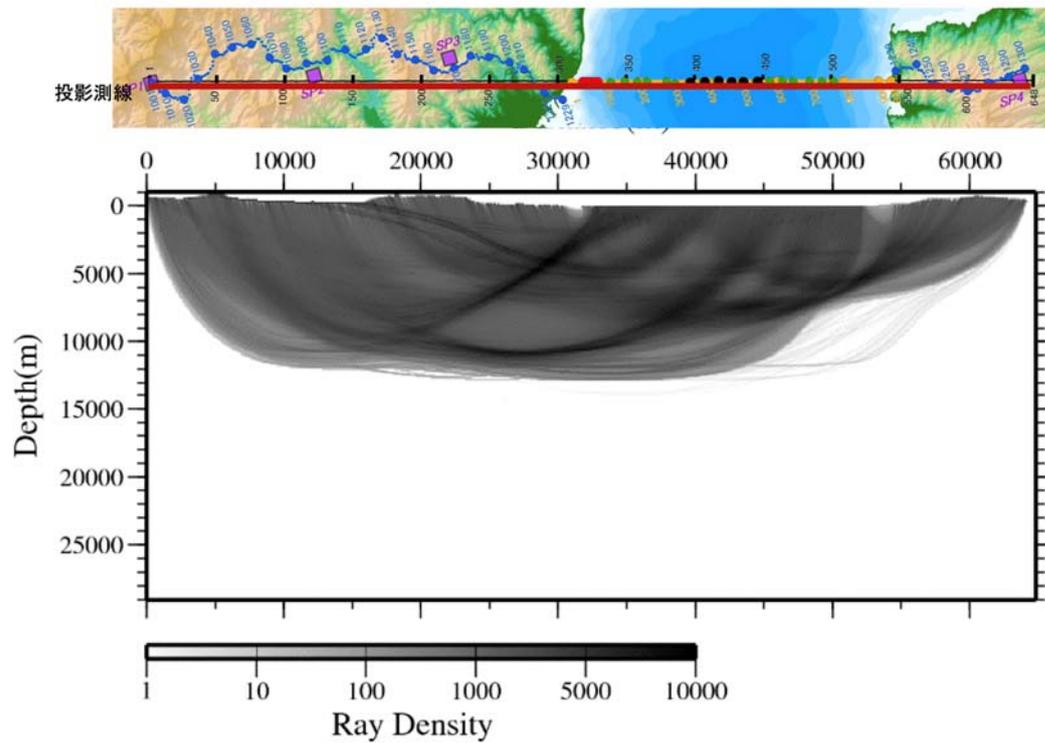


図 26 屈折トモグラフィ解析結果（波線密度）。

4) 深度変換

屈折トモグラフィ解析（後述 d）参照）により推定された区間速度分布から、浮動基準面を起点とする鉛直下向きの平均速度を計算し、時間及び空間方向に平滑化した平均速度分布を用いて、'Vertical Stretch'法による深度変換を実施した（図 27）。また、比較として防災科学技術研究所による自然地震トモグラフィ解析（Matsubara et al., 2017）に、本プロジェクトでの東海大学による自然地震観測データを加えて得られた速度構造を用いて、深度変換を実施した（図 27）。

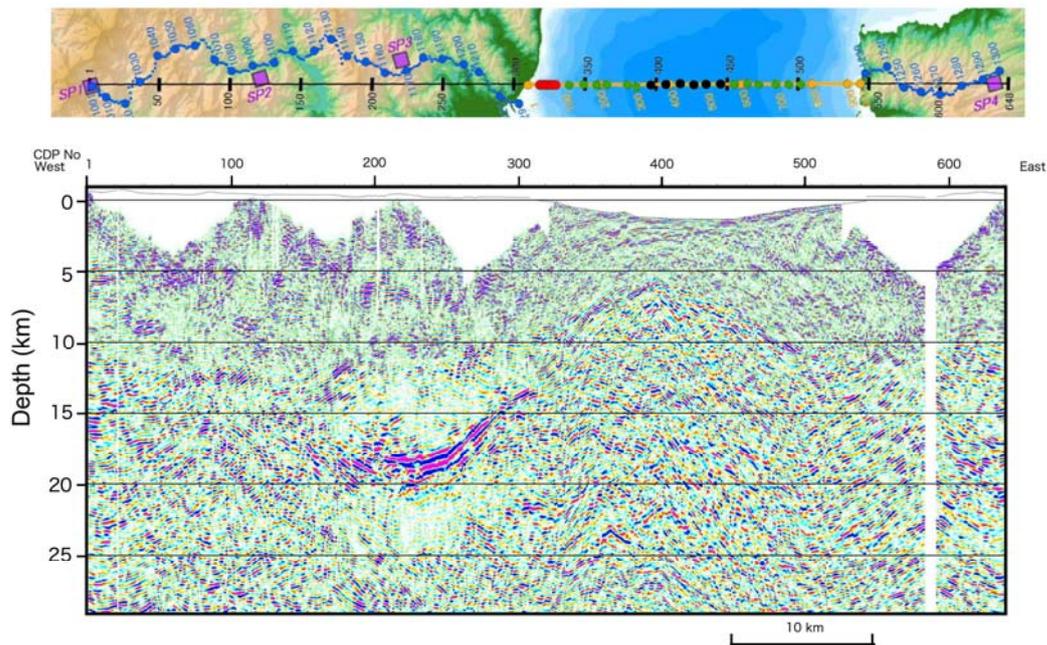


図 27 重合後時間マイグレーション深度断面図。

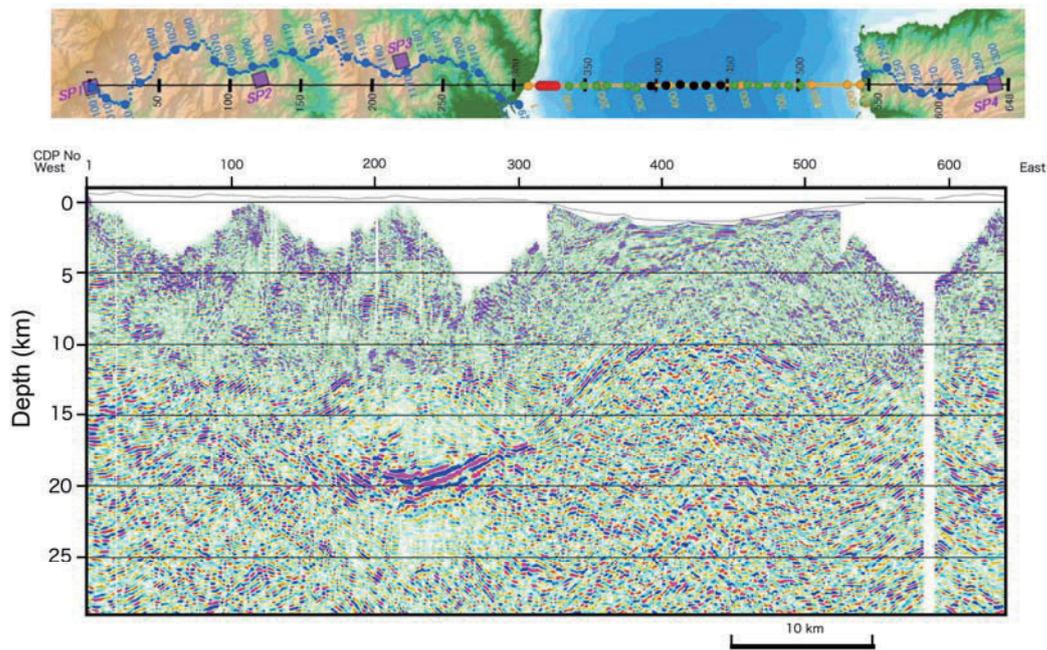


図 28 重合後時間マイグレーション深度断面図。

深度変換には東海大学の海底地震観測結果を含めて解析した自然地震トモグラフィ速度構造を用いた。

5) データの地質学的解釈

深部地殻構造探査断面の解釈に先立ち、地質構造が判断しやすい海洋大学が取得した反射法地震探査深度変換断面について検討する（図 29）。この断面は 600 m、96 チャンネルのシステムで取得されたデータを基に解析されたもので、とくに浅部の構造について高分解能でデータが取得できるという特徴がある。重合測線の位置と CDP 番号を図 29 に示した。反射面群の特徴をもとに以下のように区分した。伊豆弧の火山岩・火山砕屑岩(Iv)、伊豆弧背弧海盆堆積物(Is)、駿河トラフ充填堆積物(Sf)、西南日本弧の新生代付加帯堆積層(Na)、前弧海盆堆積物(Fb)である。ユニット Iv は西傾斜の連続性の悪い不明瞭な反射面が卓越し、全体として西に傾斜する。岡村・他（1999）によって音響基盤として取り扱われたユニットに相当する。CDP4000 から 6000 にかけての領域は連続性の良好な反射面からなるユニットで西に傾斜する。下位の Iv ユニットとは明瞭な反射面で区分され、Iv 上面と平行な傾斜を示すことから、伊豆弧の背弧海盆堆積物と判断される。岡村・他（1999）の加茂沖層群に相当する。CDP3500 周辺では、ほぼ水平な連続性の良好な反射面群から構成されるユニット Sf が、西傾斜のユニット Is を中角度の不整合で覆う。ユニット Sf は、岡村・他（1999）の富士川沖層群に相当し、下位のユニット Is を不整合に覆っており、駿河トラフを充填した堆積層と推定される。トラフ充填堆積物は全体としては西方に厚い楔型の形状を示している。このユニットの西端は低角度で西に傾斜する境界で、反射面に乏しいユニット（Na）と接している。このユニットは、岡村・他（1999）の石花海（せのうみ）層群に相当する。海底地形にも隆起帯を形成し、隆起帯東端基部（CDP1800 付近）ではトラフ充填堆積物と西傾斜の低角度の境界をなしていることからスラスト（F1）、とくに emergent thrust と判断した。このスラストは、より東側のトラフ充填堆積物中にも軽

微な変形を与えている可能性があり、伏在スラストを推定した (F3、図 29)。尚、データ取得の際に使用したストリーマーケーブルが短く、明瞭なサブスラストのイメージングが得られなかったため、これらの断層は推定断層とした。この隆起帯の成長に伴いその西側では小規模な piggy-back basin 状の堆積盆が形成され、連続性の良好な反射面が卓越する堆積ユニット (Fb) が分布する。岡村・他 (1999) の焼津沖層群・富士川沖層群に相当する。この地層が東傾斜を示すことは、通常の piggy-back basin での傾動とは逆向きであり、駿河トラフと西岸の海陸境界部の断層活動を示唆する可能性がある (F2、図 29)。

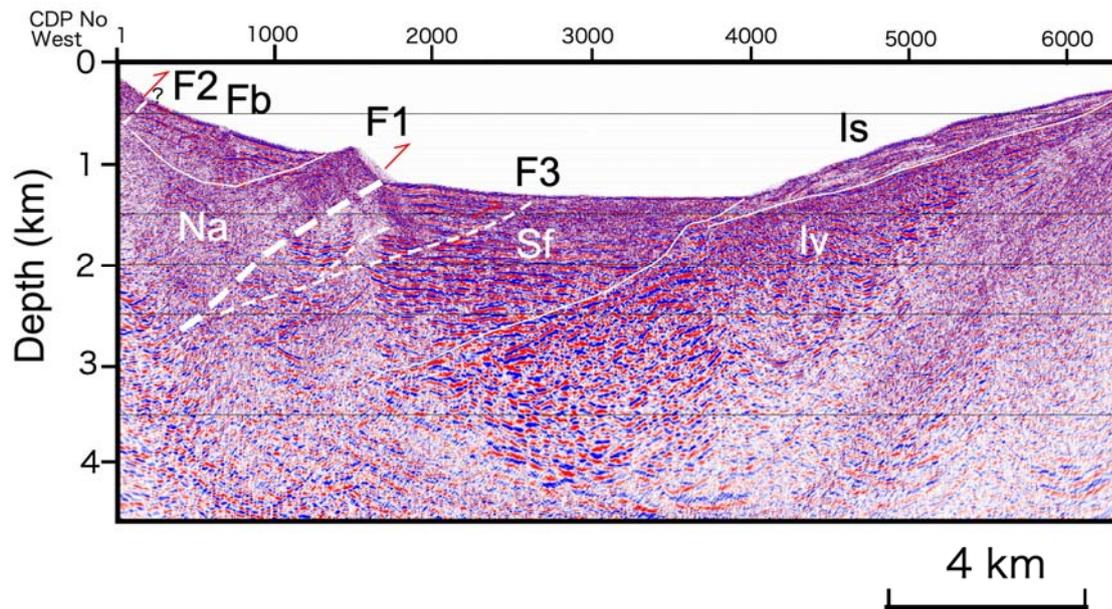


図 29 ストリーマーケーブルによる反射法地震探査深度変換断面と地質学的な解釈。伊豆弧の火山岩・火山砕屑岩(Iv)、伊豆弧背弧海盆堆積物(Is)、駿河トラフ充填堆積物(Sf)、西南日本弧の新生代付加体堆積層(Na)、前弧海盆堆積物(Fb)である。

図 29 の断層 F1 は、水平に層理を示すトラフ充填堆積物と西側の東傾斜の構造境界をなすもので、最も明瞭な境界断層であり、フィリピン海プレートと上盤側プレートのプレート境界断層と判断される。屈折トモグラフィによる速度構造と、この速度構造に基づく深度変換断面 (図 27) を重ね合わせたものを図 30 に示す。反射面の形状からは F1 の断層が顕著であるが、累積した構造を示す速度構造の観点からは、むしろ F1 の西側に位置する F2 断層の地下延長に沿った領域で、速度構造の逆転を示している。このことは、F2 がより古い断層で物質境界として顕著であるが、F1 はより新期の活動を示しているものと判断される。

伊豆小笠原弧の背弧海盆を構成するユニットでは西に傾斜した反射面が卓越し、図 31 では Ibc として区分した。CDP200-300 に欠けて深さ 13 km から 20 km にかけて西な傾斜する明瞭な反射面群 (RI) が分布する。Ri は伊豆小笠原弧の背弧地殻中の反射面と考えられる。この傾斜も F1 の延長と同様に西に傾斜する。速度構造からも顕著な F2 断層は、F2 の反射面群よりは傾斜が大きく、深さ 8 km 程度で、プレート境界に収斂するものと判

断される。Ibc と本州側の地殻 (Hc) との境界は、西傾斜の反射面群の上面を繋ぐことによって推定した。

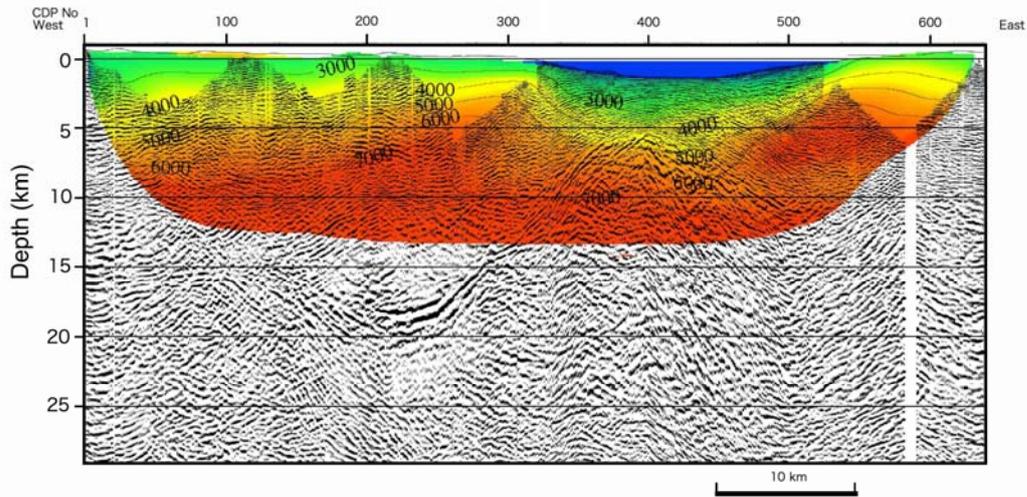


図 30 屈折トモグラフィによる速度構造を屈折トモグラフィの速度構造を主とした速度構造で深度変換断面に重ねて表示した断面図。数値は、P 波速度 (m/sec) の値。細かい実線は等速度線。

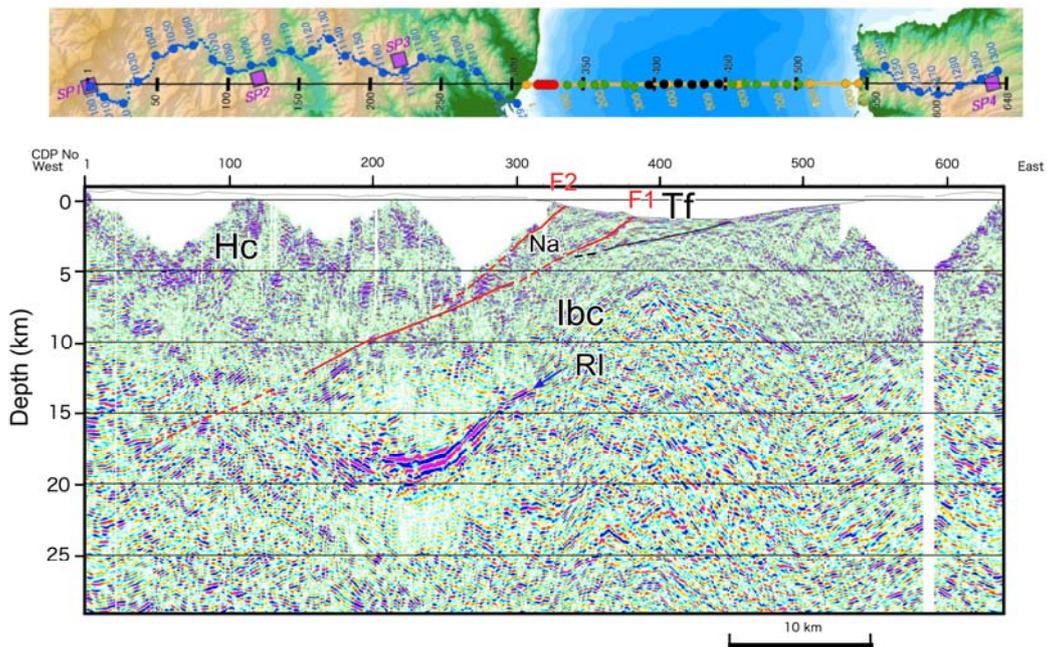


図 31 深度変換断面の地質学的解釈。赤線:活断層-震源断層。Tf:トラフ充填堆積物、Ibc:伊豆-小笠原弧の背弧地殻、RI:伊豆-小笠原弧の顕著なスラブ内反射面、Na: 新生代後期付加体、Hc: 本州側の地殻。

(c) 結論ならびに今後の課題

駿河湾を横断する海陸統合地殻構造探査を行い、反射法地震探査断面の他、P波速度構造断面を得た。この断面により、駿河湾に想定されるプレート境界断層である活断層・震源断層の形状が明らかになった。この地殻構造断面の特徴と地震波トモグラフィや、地震活動の諸特徴を考慮して、震源断層モデルを構築するための重要な資料が得られた。また、長期評価にとって重要な変動地形・地質学的に明らかになる変形速度から、全体のカップリングの議論に必要な平均変位速度を求めることが可能になる。今後、波線追跡法などの解析を行い、より精度の高い深度変換を行っていく。

(d) 引用文献

- Asakawa, E. and T. Kawanaka, Seismic raytracing using linear travelttime interpolation, *Geophys. Prosp.* 41, 99-111, 1993.
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会：富士川河口断層帯の調査結果と評価について， 32p., 1998.
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会：富士川河口断層帯の評価（一部改訂）， 54p., 2010.
- 狩野謙一・伊藤谷生：伊豆半島南部の新第三系白浜層群に見られる浅海底火山活動と堆積・造構過程との相互作用. *地質学雑誌*, 122, 8, 413-432, 2016.
- 小山真人：伊豆の大地の物語. 静岡新聞社， 303p., 2010.
- Matsubara, M., H. Sato, T. Ishiyama, A. Van Horne, Configuration of the Moho discontinuity beneath the Japanese islands derived from three-dimensional seismic tomography, *Tectonophysics*, 710-711, 97-107, 2017.
- 松田時彦：富士山の基盤の地質と地史. 富士火山，山梨県環境科学研究所， 45-57, 2007.
- 岡村行信・湯浅真人・倉本真一・石原丈実・上嶋正人・駒沢正夫：駿河湾海底地質図1:200,000, 海洋地質図 52, 地質調査所, 1999.
- 尾崎正紀・水野清秀・佐藤智之：5万分の1富士川河口断層帯及び周辺地域地質編纂図及び説明書，海陸シームレス地質情報集，駿河湾北部沿岸域，海陸シームレス地質図 S-5, 57p., 2016.
- 佐藤智之・荒井晃作：20 万分の 1 駿河湾北部沿岸域海底地質図説明書 海陸シームレス地質情報集，駿河湾北部沿岸域，海陸シームレス地質図 S-5，1-25, 2016.
- 白石和也，阿部進，岩崎貴哉，斉藤秀雄，佐藤比呂志，越谷信，加藤直子，新井隆太，川中卓，屈折初動走時トモグラフィ解析における初期モデルランダム化による解の信頼性評価，*物理探査*, 63, 4, 345-356, 2010.
- Shiraishi, K., G. Fujie, T. Sato, S. Abe, E. Asakawa and S. Kodaira, Interferometric OBS Imaging for wide-angle seismic data, *Geophysics*, 82, Q39-Q51, 2017.
- 杉山雄一・下川浩一・坂本亨・泰光男：静岡地域の地質. 地域地質研究報告（5万分の1図幅），地質調査所， 82p., 1982.
- 杉山雄一・下川浩一：清水地域の地質. 地域地質研究報告（5万分の1図幅），地質調査所， 103p., 1990.

杉山雄一・松田時彦:南部地域の地質.地域地質研究報告(5万分の1 地質図幅), 産総研地質調査総合センター, 134 p., 2014.

(2-2) 海域地下構造探査

鶴我佳代子・林 敏史・近藤逸人・青山千春・中東和男（東京海洋大学）

(a) 業務の要約

駿河トラフを横断する区間での反射法ならびに屈折法による海陸統合地殻構造探査を実施するため、海域において東京海洋大学の神鷹丸に搭載した 1950 cu inch のエアガンを用いた繰り返し発震を実施した。また同海域において、東京海洋大学の保有するストリーマーケーブルシステムを用いたマルチチャンネル反射法地震探査もあわせて実施した。

測線交点での速度構造の連続性に留意し多重反射抑制処理により、地質構造の解明に繋がる反射法地震探査断面を得た。また同一とみなせる測線上に存在する互いに異なる発震点と受振記録を有する測線群のデータセットの併合処理をおこない、地下構造の空間解像度を向上させた。その結果、特に、駿河湾北部の東西測線（H29-L02；図 1）ではフィリピン海プレートがユーラシアプレートの下へ沈み込む上面と見られる明瞭な連続的な反射面が深さ 2～3 km 程度まで確認された。この測線は、平成 30 年度に実施予定の海域統合測線と斜交するものであるため、得られた知見は今後の探査の大きな基礎となった。

(b) 業務の成果

1) 調査地域の地質概要

駿河湾は陸/海のプレート境界である南海トラフの東端に位置し、その地質構造は南北に伸びる駿河トラフを境に東側の伊豆半島と西側の静岡市側で大きく異なる（岡村・他、1999）。伊豆半島側は主に火成岩類からなる基盤が西側の駿河トラフ底に向かって傾斜し、その上面には 100～300 万年前に形成されたとされる浸食平坦面と第四紀地層が発達し覆っている。静岡沖斜面は第四系からなる背斜構造を有する石花海の海盆とその隆起帯に区分され、駿河湾に下る急斜面は著しく変形した堆積岩からなるとされている。

駿河湾での地震活動は湾南部の石花海～石廊崎のエリアにはほぼ限られているが（本報告書(2-3)項）、駿河湾は南海トラフの東端域であり東海地震の震源想定域とされているエリアであることから、地震活動や地殻変動など陸上での重点観測網の整備がなされてきた。しかしその一方で、海域の地下構造調査は未だ十分ではなく、駿河トラフ全体のプレートの沈み込み構造を俯瞰できるものではないため、正確な強震動予測など防災や減災に有効な地殻構造の情報の取得が急務である。

2) 海域における人工地震探査の概要

本業務では、東京海洋大学練習船「神鷹丸」を利用した海域における人工地震探査を 2018 年 10 月 1 日～10 月 9 日の期間中に実施した。調査測線は、海陸統合地殻構造探査測線が通過する駿河湾北部海域にエアガン発震のための測線 H30-R00（約 20 km）を設定した。またマルチチャンネル反射法地震探査の測線として、測線 H30-R00 と重なる測線 H30-L00（長さ約 19 km）、測線 H30-R00 の南約 7 km に位置する東西測線 H30-L02（長さ約 16 km）および伊豆半島北部側の南北測線 H30-L01（長さ約 221 km）を設定した。図 1 および表 1 に本業務における人工地震探査測線の配置および概要を示す。

エアガンによる発震は、測線 H30-R00 上において、2018 年 10 月 2 日午後 11 時 50 分

～10月3日午前2時25分、および、10月3日午後9時45分～10月4日午前3時16分の2夜間、東京海洋大学練習船「神鷹丸」で船尾両舷より曳航した2式のエアガン震源（エア総容量1950 in³）を用いて実施した。エアガン震源は、異なるエア排出容量を有するBolt社製Tri-Gun（エア総容量1050 in³および900 in³）で構成された。エアガン発震は測線上を往復し（東から西への航路もしくは西から東への航路）各々50 m 間隔で行ったが、往路および復路の発震点群を組み合わせた最終的な発震点分布における平均発震間隔は25 m となった。これらの人工地震波は、海底設置した海底地震計アレイおよび陸上の地震計アレイでデータ取得された。

マルチチャンネル反射法地震探査は、測線 H30-L00、測線 H30-L02、および測線 H30-L01 において実施した。本業務期間中の2018年10月7日は台風のため荒天待機となったが、その他の日は海況に恵まれ反射法地震探査の実施が可能となった。神鷹丸による地震探査の様子を図2に示す。マルチチャンネル反射法地震探査では、東京海洋大学が保有する可搬型海域2次元地震探査システム（Tsuruga et al., 2017；鶴我・他, 2018）を用いた。測線 H30-L00 および H30-L02 では、本業務のエアガン発震で用いたエア総容量1950 in³の Bolt 社製 Tri-Gun 2 式を用い、発震点間隔50 m で実施した。また測線 H30-L01 では、エア総容量1050 in³の Bolt 社製 Tri-Gun を1式を曳航し、発震点間隔25 m で実施した。

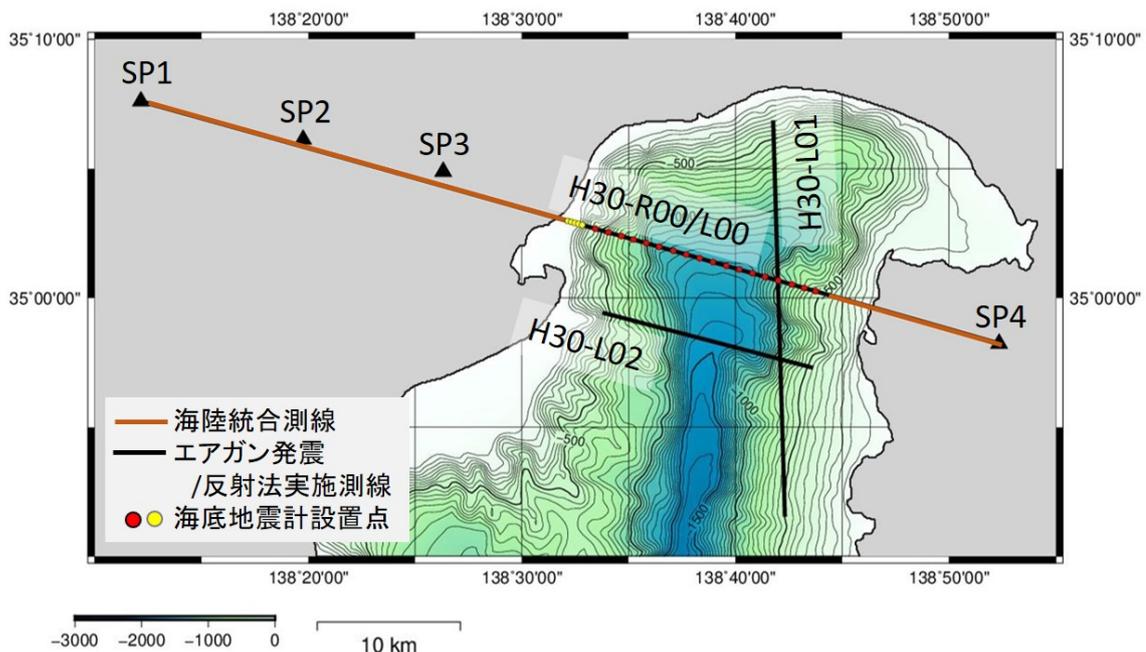


図1 駿河湾北部海域におけるエアガン発震測線およびマルチチャンネル反射法地震探査測線の配置図。

橙色線は海陸統合地殻構造探査測線、海域部の測線 H30-R00（黒線）はエアガン発震測線を表す。測線 H30-L00（黒線）は、統合測線 H30-R00 の海域部でのマルチチャンネル反射法地震探査の実施測線を表す。赤丸印および黄丸印は期間中に臨時設置した海底地震計23点の位置を示す。なお測線配置図は、岸本（2000）による地形データを用い、GMT（The Generic Mapping Tool）によって作成した。

表1 エアガン発震測線およびマルチチャンネル反射法地震探査測線の概略。

測線名	測線長(km)	探査方法	発震数	発震 / 受振
H30-R00-1, -2, -3, -4	19.45-19.75	屈折法	1479	1950 cu-in/間隔 25 m(往復2回)
H30-L00	19.55	反射法	392	1950 cu-in/間隔 50 m(1回)
H30-L01-1	4.97	反射法	200	1050 cu-in/間隔 25 m(各1回) 一部重複あり
H30-L01-2	16.10		323	
H30-L02	16.10	反射法	323	1950 cu-in/間隔 50 m(1回)

2) 調査方法および取得データの概要

エアガン発震作業およびマルチチャンネル反射法地震探査の手法および取得データの概要を以下に述べる。

海域での人工地震探査は、東京海洋大学練習船「神鷹丸」（総トン数986 トン、全長65 m、幅12.10 m）を利用して行った。図2 に神鷹丸での海域調査の様子を示す。神鷹丸の後部甲板および室内観測室に東京海洋大学が保有する可搬型海域2次元地震探査システムを設置し、エアガン発震作業での指令・制御を行い、マルチチャンネル反射法地震探査での機器制御およびデータ取得を行った。地震探査システムは、10フィートコンテナ規格の格納庫に入った震源部、コンプレッサー、受振アレイ部、およびPC等の制御・収録システムにより構成される。エアガン発震作業およびマルチチャンネル反射法地震探査のデータ取得に関するパラメータを表2に示す。なおエアガン発震作業については、表2中では「屈折法」と記述している。

エアガン発震作業では、異なるエア排出容量を有するBolt社製エアガンTri-Gun（エア総容量1050 in³および900 in³）を、神鷹丸船尾両舷より曳航し実施した。測線H30-R00-01～H30-R00-04における発震点間隔は50 mであった。

マルチチャンネル反射法地震探査は、測線H30-L00、測線H30-L01および測線H30-L02において実施した。測線によって用いたエアガン震源が異なる。測線H30-L00およびH30-L02では、上述のエアガン発震作業で用いたエアガン（エア総容量1950 in³）を用い、発震点間隔50mとした。また測線H30-L01では、Bolt社製エアガン1500 LL（350 in³）3基で構成されるエアガンTri-Gunを1式右舷曳航により、25 m 間隔で発震した。海上受振アレイは、Hydroscience 社製デジタルストリーマーカーケーブル（長さ600 m、センサー間隔6.25 m、96チャンネル）と最後尾の測位用テールブイで構成された。探査中、船速は約3.5ノットで航行した。

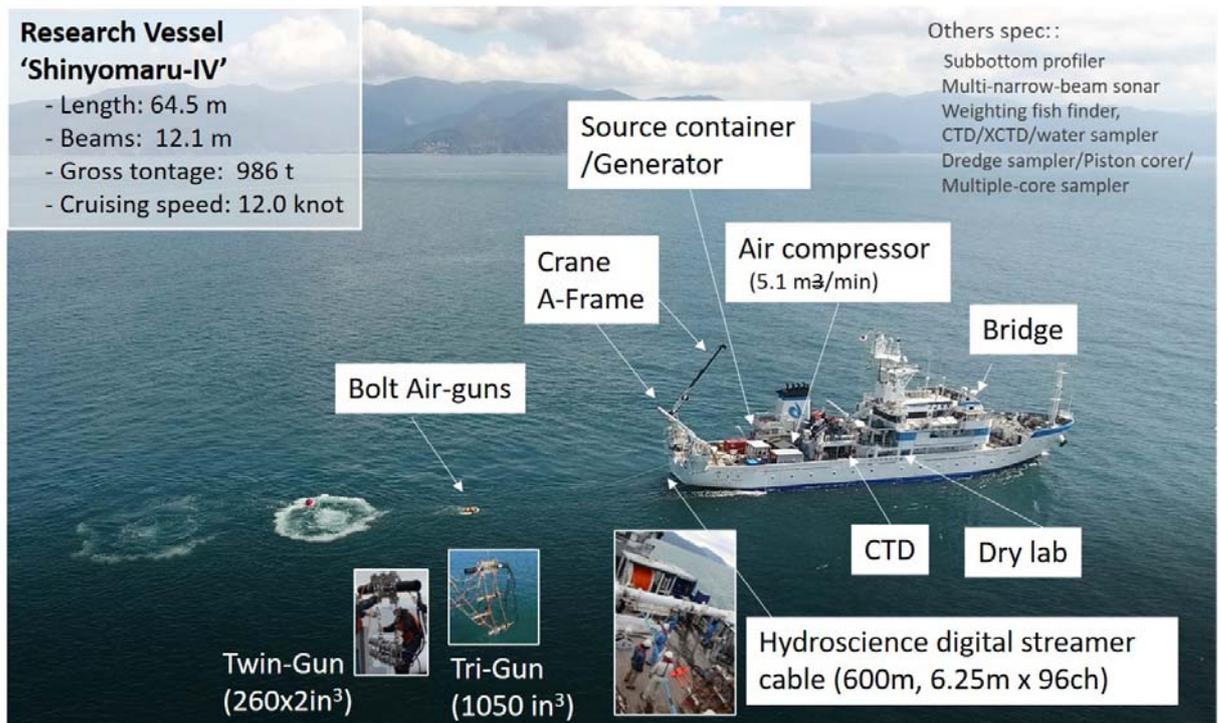


図 2 エアガン発震およびマルチチャンネル反射法地震探査を実施した東京海洋大学練習船「神鷹丸」の概要および反射法地震探査の様子 (Tsuruga et al., 2018)。

表2 エアガン発震およびマルチチャンネル反射法地震探査のデータ取得に関するパラメータ。

		H30年度
発 震 系	震源タイプ	BOLT社製 Air Gun (1500LL Tri-Gun)
	ガン容量	350 in ³ x 3基 x 1式 および 300 in ³ x 3基 x 1式
	発震圧力	2000 psi
	発震深度(標準)	屈折法 10 m 反射法 6 m
	発震点間隔(標準)	屈折法・反射法 25 m 反射法 (H30-L00) 50 m
受 振 系	ストリーマーカーケーブル	Hydroscience 社製 デジタルストリーマーカー 海洋大 6セクション, 東大AORI 2セクション
	チャンネル数・間隔	96 チャンネル、受振点間隔6.25 m
	ケーブル長	600 m
	ニアオフセット(標準)	62 m
	ケーブル深度(標準)	6 m
収 録	記録時間	8 sec
	サンプルレート	1 msec

3) マルチチャンネル反射法地震探査データの簡易処理結果

マルチチャンネル反射法地震探査を実施した測線 H30-L00、H30-L01 および測線 H30-L02 で取得したデータについて、共通反射点 (CMP) 重合処理および簡易な速度構造を用いた時間マイグレーション処理の結果を示す。測線 H30-L00 で取得したデータ処理の詳細な結果については、前節で述べた通りである。ここでは、機器調整のために設定した測線 H30-L01 および測線 H30-L02 の 1 次的な処理結果を示す。図 3 および図 4 は、測線 H30-L01 および H30-L02 で取得したデータについて簡易な時間マイグレーション処理をおこなった地震断面図の結果である。いずれも一定速度 1500 m/sec を適用したものである。測線 H30-L01-1 および H30-L01-2 を南北に一直線になるようにデータを統合した。図 3 は、伊豆弧側の上面の堆積層などの地層境界と考えられる反射面が連続的に観察された。また図 4 では、海陸統合地下構造測線 H30-L00 や、平成 29 年度に東京海洋大学が実施した北部のマルチチャンネル反射法地震探査の際の測線 H29-L02 (Tsuruga et al, 2017; 2018) とよく似た西傾斜の反射面の連続が観察された。

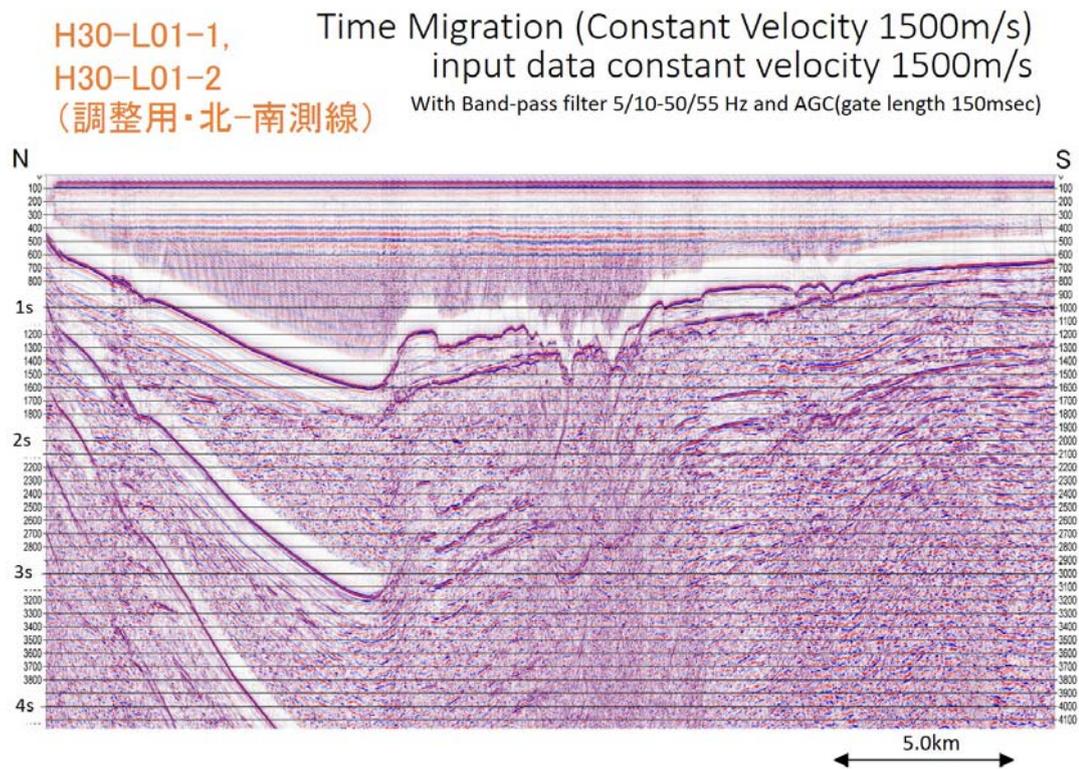


図 3 簡易な時間マイグレーション処理をおこなった地震断面図 (測線 H30-L01)。一定速度 1500 m/sec を適用したもの。測線 H30-L01-1 および H30-L01-2 を南北に一直線になるようにデータを統合した。

H30-L02
(調整用・東-西測線)

Time Migration (Constant Velocity 1500m/s)
input data constant velocity 1500m/s
With Band-pass filter 5/10-50/55 Hz and AGC(gate length 150msec)

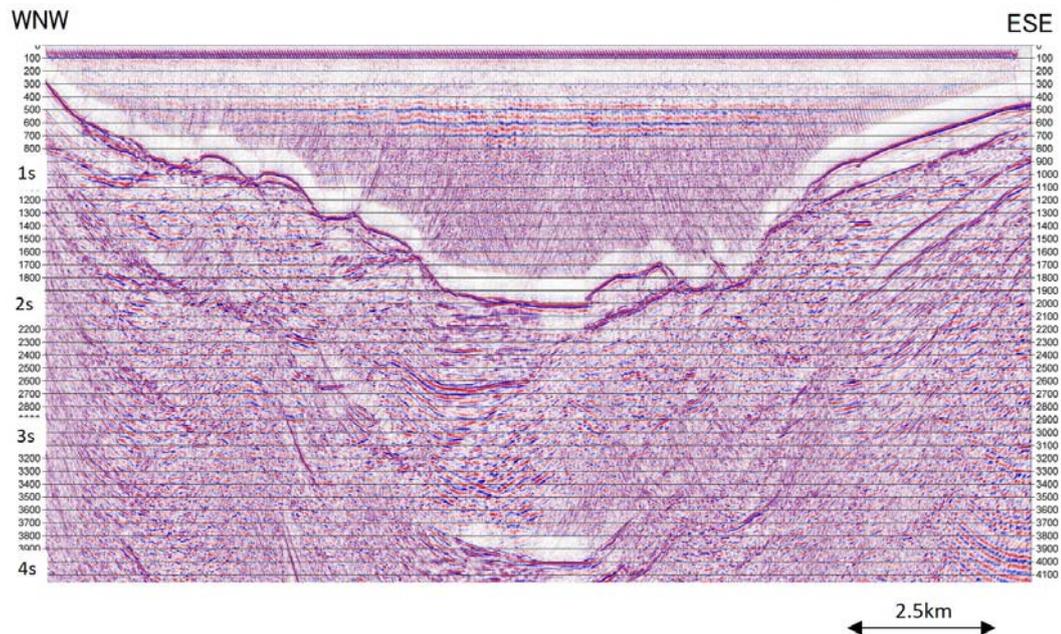


図 4 簡易な時間マイグレーション処理をおこなった地震断面図(測線 H30-L02)。一定速度 1500 m/sec を適用したもの。測線 H30-L00 にほぼ平行な測線。

(c) 結論ならびに今後の課題

本業務では、駿河トラフを横断する区間での反射法ならびに屈折法による海陸統合地殻構造探査を実施するため、海域において東京海洋大学の神鷹丸に搭載した 1950 cu inch のエアガンを用いた繰り返し発震を実施した。また同海域において、東京海洋大学の保有するストリーマケーブルシステムを用いたマルチチャンネル反射法地震探査もあわせて実施した。測線 H30-L00 におけるマルチチャンネル反射法地震探査の結果については前節で述べたように、明瞭な反射面をいくつか確認し、伊豆弧の上面および沈み込むスラブの上面を示している可能性を示唆した。一方、他のマルチチャンネル反射法地震探査を実施した 2 測線のデータについては簡易処理の結果を取得しており、今後の課題として、より詳細の解析を進めることが挙げられる。

(d) 引用文献

岸本清行, 海陸を合わせた日本周辺のメッシュ地形データの作成 : Japan250.grd, 地質調査所研究資料集, 353, CD-ROM, 地質調査所, 2000.

岡村行信・湯浅真人・倉本真一, 20 万分の 1 「駿河湾海底資質図および説明書」, 海洋地質図シリーズ, 52, 産業技術総合研究所, 1999.

Tsuruga, K., Y. Sekino, J. Kanda, T. Hayashi, R. Hagita, T. Aikawa, T. Hosaka, H. Sugawara, H. Baba, K. Suyehiro, C. Aoyama, T. Tsuru, K. Nakahigashi, S. Ohnishi, T. Inamori, N. Inoue, M. Onshini, T. Kuroda, T. Iiduka, N. Murata, D. Sugawara, Y.

Ueda, and K. Fujita, The 1st sea trial of 2-D Seismic reflection and refraction surveys in Suruga Bay, Central Japan, by TUMSAT (1st report), JpGU-AGU Joint Meeting, Abstract, E_SC71_P14, Chiba, Japan, 2017.

鶴我佳代子・関野善広・神田穰太・近藤逸人・林敏史・曾川鉄太郎（東京海洋大学）・馬場久紀（東海大学）・菅原博（東京海洋大学），東京海洋大学による駿河湾における第2回海域2次元反射法・屈折法地震探査（序報），日本地球惑星科学連合2018大会予稿，千葉，2018.

Tsuruga, K., Y. Sekino, F. Hayashi, H. Baba, H. Sato, R. Hagita, T. Aikawa, H. Kondo, J. Kanda and Seismic survey team of Tokyo Univ. Marine Sci. Tech., Shallow subduction zone structures of Suruga Trough, central Japan, by means of 2-D seismic reflection and refraction surveys by Tokyo University of Marine Science and Technology, American Geophysical Union 2018 Fall Meeting, Abstract T41G-0372, Washington DC, US, 2018.

鶴我佳代子・佐藤比呂志・馬場久紀・関野善広・林敏史・近藤逸人・青山千春・曾川鉄太郎・石山達也・篠原雅尚・川崎慎次・田中康久、東京海洋大学「神鷹丸」による駿河湾北部における反射法・屈折法地震探査（序報），日本地球惑星科学連合2019大会，千葉，2019（予定）.

(2-3) 駿河湾の海底地震観測

馬場久紀（東海大学）

(a) 業務の要約

駿河湾富士川河口断層帯やその周辺の断層運動によって発生する地震活動を調査するために、本業務では駿河湾北部の富士川河口沿岸域に 2018 年 4 月～2018 年 8 月までの期間において 4 台の海底地震計（OBS）を設置した。同期間では、東海大学と気象庁気象研究所が共同で展開している OBS が駿河湾中央部に 4 台（馬場・他, 2015）、さらに地震予知総合研究振興会の OBS も 2 台設置されていて、これらすべての OBS データを用いて震源決定を行った。

この期間に駿河湾の海底下で決められた震源は約 200 イベントであった。これらの地震は陸上の定常観測網では決められていない小さい規模の地震（M1～2）も多く含まれている。震源は、主に 2009 年（気象庁、2009・2010）と 2011 年（気象庁、2012）に発生した地震（M6 クラス）の余震と考えられる。また、2018 年 8 月 10 日に焼津沖で M4.5 の地震も発生した。

(b) 業務の実施方法

本業務で準備された 4 台の OBS は、東海大学海洋学部所有の小型船舶作業船「南十字（20 トン）」にて、図 1 に示されている位置（●FUJ031・FUJ032・FUJ033・FUJ034）に 2018 年 4 月 18 日に設置された。OBS の回収作業は、2018 年 8 月 21 日に小型船舶作業船「北斗（18 トン）」で行った。

4 台の OBS には原子時計が内蔵されており、約 3 ヶ月間の観測で 0.01～0.02 秒の誤差が生じる程度である。記録のサンプリングレートは 100 Hz、地震計は上下動 1 成分・水平動 2 成分の 3 成分地震計がジンバル機構によって OBS 内に組み込まれている。

震源決定ための検測作業は、卜部・東田（1992）による WIN システムを利用した。また、震源決定計算には、Hirata and Matsu'ura（1987）の Hypomh を使用した。なお、海底下の堆積層による影響を取るための堆積層補正には、PS 変換波を読んで補正を行った（Iwasaki et al., 1991）。

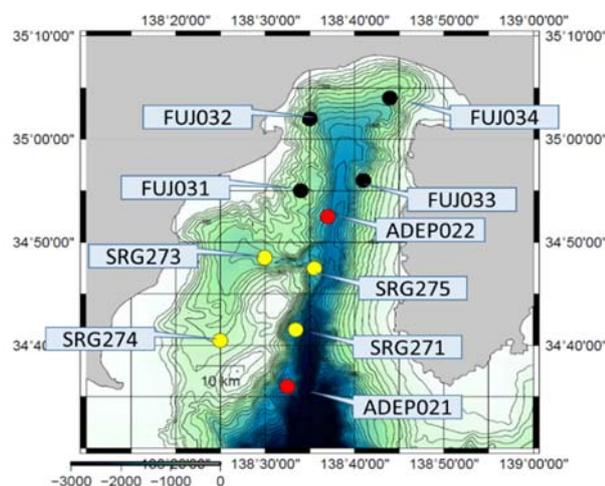


図 1 OBS 配置図●:FUJ（本事業で設置した観測点）、●:FUJ（気象庁観測点）、●:ADEP（地震予知総合研究振興会観測点）。

(c) 業務の成果

本業務で設置した4台のOBS(図1:●)が観測を行った期間(2018年4月18日~2018年8月21日)では、このOBS以外にも東海大学・気象庁気象研究所(石花海周辺海域)の定常観測点(馬場・他, 2015)として4台のOBS(図1:●, 観測期間:2018年5月31日~2018年9月3日)と、地震予知総合研究振興会の2台のOBS(図1:●, 観測期間:2018年5月2日~2018年9月2日)が展開されていた。これら10台のOBSで得られたデータを用いて、2018年6月1日~2018年8月21日までの期間について震源決定を行った。図2に決められた震源分布図を示す。今回震源決定に用いた地下速度構造は、気象庁の一元化震源で用いられるモデルJMA2001を用いて計算を行った。

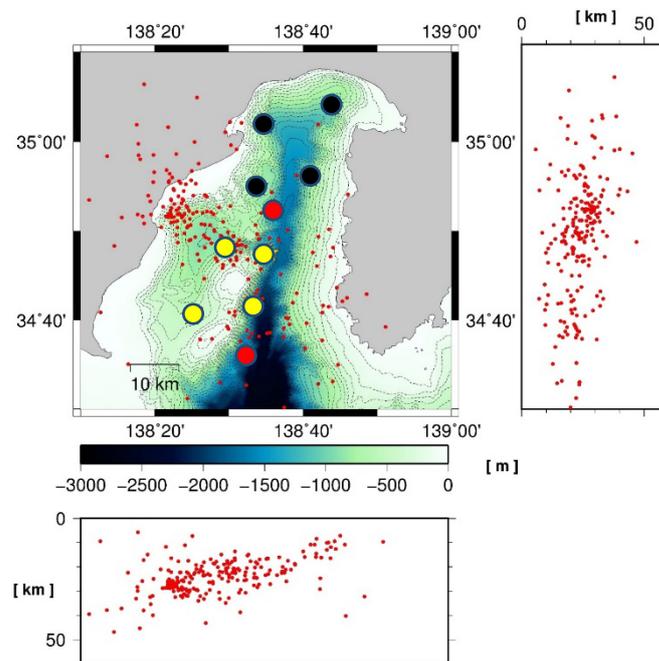


図2 OBS観測点によって決められた震源分布図。
期間:2018年6月1日~2018年8月21日

決められた震源分布の特徴について、

- ・期間内に駿河湾で決められた震源数は216個であった。
- ・震源のほとんどは焼津沖で2018年8月10日に発生したM4.5の地震とその余震であった。
- ・駿河湾北部・富士川河口周辺では、震源がほとんど決められなかった。
- ・震源分布東西断面を見ると駿河湾下では、西下がり(西に深くなる)に震源が並ぶ様子が見られた。

ということが解った。

(d) 結論ならびに今後の課題

富士川河口断層帯とその周辺の断層活動によって発生する地震活動を調査するために、駿河湾でOBSによる地震観測を実施した。その結果、陸域の定常観測網では観測するこ

とができない（検知することができない）地震も含め、全 216 個の震源を決めることができた。しかしこれらの震源は、ほとんどが焼津沖に集中したことから、2009 年と 2011 年に発生した駿河湾の M6 クラスの 2 つの地震の余震域にあたりと考えられる。残念ながら、駿河湾北部・富士川河口周辺に求まった震源はほとんどない。

今後の予定として、平成 29 年度の業務で実施された 2018 年 1 月 16 日～4 月中旬までの地震観測データと今回の地震観測データを合わせて、本事業による構造探査結果に基づいた地下速度構造モデルを用いて再度震源決定を行う必要がある。また、震源決定は、陸上の定常観測点のデータも併せて解析を行う。これはサブテーマ 3（地震活動から見たプレート構造）と関連して解析を行う予定である。

(e) 参考文献

馬場久紀・平田賢治・山崎明・対馬弘晃・勝間田明男・前田憲二・上野寛・青木重樹・小林昭夫・木村一洋・弘瀬冬樹・長尾年恭（2015）：自己浮上式海底地震計（OBS）を用いた駿河湾石花海周辺海域における連続地震観測，東海大学海洋研究所報告，36，23-29.

Baba H., S. Ichinose, K. Hirata, A. Yamazaki, H. Tsushima, K. Nakata, T. Nishimiya, K. Imamura and T. Nagao (2017), Continuous Earthquake Observation using pop-up Ocean Bottom Seismographs (OBSs) In Suruga Bay at the Pacific Coast of Shizuoka, Japan, 2017 American Geophysical Union, Fall Meeting T41C-0645.

防災科学技術研究所（2010），2009 年 8 月 11 日駿河湾の地震：過去の地震活動状況・発震機構解変化，地震予知連絡会会報，83，6-8，247-257.

Hirata N. and M. Matsu'ura (1987) , Maximum-likelihood estimation of hypocenter with origin time eliminated using nonlinear inversion technique, Phys. Earth Planet. Inter., 47, 50-61.

Iwasaki T., N. Hirata, T. Kanazawa, T. Urabe, Y. Motomiya and H. Hirayama (1991) , Earthquake distribution in the subduction zone off eastern Hokkaido, Japan, deduced from ocean-bottom seismographic and land observations, Geophysical Journal Inter., 105, 693-711.

気象庁（2009），2009 年 8 月 11 日駿河湾の地震（M 6.5）について，第 183 回地震予知連絡会活動報告.

気象庁（2010），2009 年 8 月 11 日駿河湾の地震（M 6.5）について，地震予知連絡会会報，83，6-3，211-230.

気象庁（2012），2011 年 8 月 1 日の駿河湾の地震（M 6.2）について，地震予知連絡会会報，87，6-2，264-269.

卜部卓・束田進也（1992），WIN-微小地震観測網波形検束支援のためのワークステーション・プログラム(強化版)，地震学会講演予稿集秋季大会，331.

(2-4) 駿河湾北部での OBS-エアガンによる屈折法地震探査

馬場久紀（東海大学）

(a) 業務の要約

駿河湾富士川河口断層帯における震源断層システムを解明するために、2018年10月2日から駿河湾北部を東西に縦断する約19kmの測線（H30-R00主測線）で、東京海洋大学練習船「神鷹丸（986トン）」による反射法・屈折法地震探査が実施された。本業務では、OBS-エアガン構造探査（屈折法地震探査）において、海底地震計（OBS）を18台設置した。18台のOBSは、東京大学地震研究所の6台、気象庁気象研究所の6台、そして地震予知総合研究振興会の6台をそれぞれ使用した。なお、これらのOBSは東海大学で整備・組立てられ（図1参照）、設置・回収においては、東海大学海洋学部所有の小型船舶作業船「南十字（20トン）」と「北斗（18トン）」で行われた。

(b) 業務の実施方法

18台のOBSは、株式会社勝島製作所製の自己浮上式タイプのもの（図1参照）であるが、内部記録器等は各所有機関においてそれぞれ仕様が異なるものであった。これらの仕様についての詳細を表2に示す。H30-R00主測線とOBSの配置図を図3に示す。OBSの整備は2018年6月から順次行われ、8月下旬から投入・設置を「南十字（20トン）」と「北斗（18トン）」にて開始、9月13日までに設置を完了した。また、本事業の一環として浅海域用のセンサー（OBX）5台の設置・回収も行った。



図1 本事業で整備され、組み立てられた OBS の様子。

表 2 OBS 観測点座標および仕様等の詳細。

観測点名	OBS所属	レコーダー	センサー	サンプル周波数	内部時計	状態	投入日時	着底位置 緯度	着底位置 経度	水深 (m)
1 FUJ04A	ERI	LS9100	3成分地震計	200Hz	水晶時計	回収	2018/8/22 9:31	35° 02.672' N	138° 33.425' E	474
2 FUJ04B	MRI	DAT	3成分地震計+Hyd付	100Hz	水晶時計	回収	2018/9/10 11:21	35° 02.545' N	138° 34.070' E	695
3 FUJ04C	ER(ADEP)	LS9100	3成分地震計	200Hz	原子時計	回収	2018/9/10 15:59	35° 02.380' N	138° 34.645' E	784
4 FUJ04D	ERI	LS9100	3成分地震計	200Hz	水晶時計	回収	2018/8/22 10:28	35° 02.296' N	138° 35.111' E	879
5 FUJ04E	MRI	DAT	3成分地震計+Hyd付	100Hz	水晶時計	回収	2018/9/10 12:21	35° 02.083' N	138° 36.004' E	1154
6 FUJ04F	ER(ADEP)	LS9100	3成分地震計	200Hz	原子時計	回収	2018/9/10 15:27	35° 01.894' N	138° 36.386' E	1184
7 FUJ04G	ERI	LS9100	3成分地震計	200Hz	水晶時計	漂流回収	2018/8/21 15:28	35° 01.822' N	138° 37.039' E	1238
8 FUJ04H	MRI	DAT	3成分地震計+Hyd付	100Hz	水晶時計	漂流回収	2018/9/10 13:20	35° 01.696' N	138° 37.718' E	1294
9 FUJ04I	ER(ADEP)	LS9100	3成分地震計	200Hz	原子時計	漂流回収	2018/9/10 14:16	35° 01.571' N	138° 38.348' E	1314
10 FUJ04J	ERI	LS9100	3成分地震計	200Hz	水晶時計	観測中	2018/8/22 11:34	35° 01.380' N	138° 38.952' E	1316
11 FUJ04K	MRI	DAT	3成分地震計+Hyd付	100Hz	水晶時計	所在不明	2018/9/3 14:58	35° 01.275' N	138° 39.515' E	1329
12 FUJ04L	ER(ADEP)	LS9100	3成分地震計	200Hz	原子時計	観測中	2018/9/13 12:33	35° 01.130' N	138° 40.154' E	1330
13 FUJ04M	ERI	LS9100	3成分地震計	200Hz	水晶時計	回収	2018/8/22 12:33	35° 00.966' N	138° 40.791' E	1249
14 FUJ04N	MRI	DAT	3成分地震計+Hyd付	100Hz	水晶時計	回収	2018/9/3 14:01	35° 00.849' N	138° 41.376' E	1079
15 FUJ04O	ER(ADEP)	LS9100	3成分地震計	200Hz	原子時計	回収	2018/9/13 10:02	35° 00.691' N	138° 41.873' E	944
16 FUJ04P	ERI	LS9100	3成分地震計	200Hz	水晶時計	回収	2018/8/22 13:23	35° 00.532' N	138° 42.634' E	737
17 FUJ04Q	MRI	DAT	3成分地震計+Hyd付	100Hz	水晶時計	回収	2018/9/3 13:17	35° 00.379' N	138° 43.208' E	584
18 FUJ04R	ER(ADEP)	LS9100	3成分地震計	200Hz	原子時計	回収	2018/9/13 9:03	35° 00.259' N	138° 43.744' E	504

OBS 所属 (ERI:東京大学地震研究所, MRI:気象研究所, ERI(ADEP):地震予知総合研究振興会)。

レコーダー (LS9100:白山工業株式会社製, DAT:クローバテック株式会社製)

■ : 未回収 OBS ないしは漂流のち海岸漂着 OBS (観測データ無し)

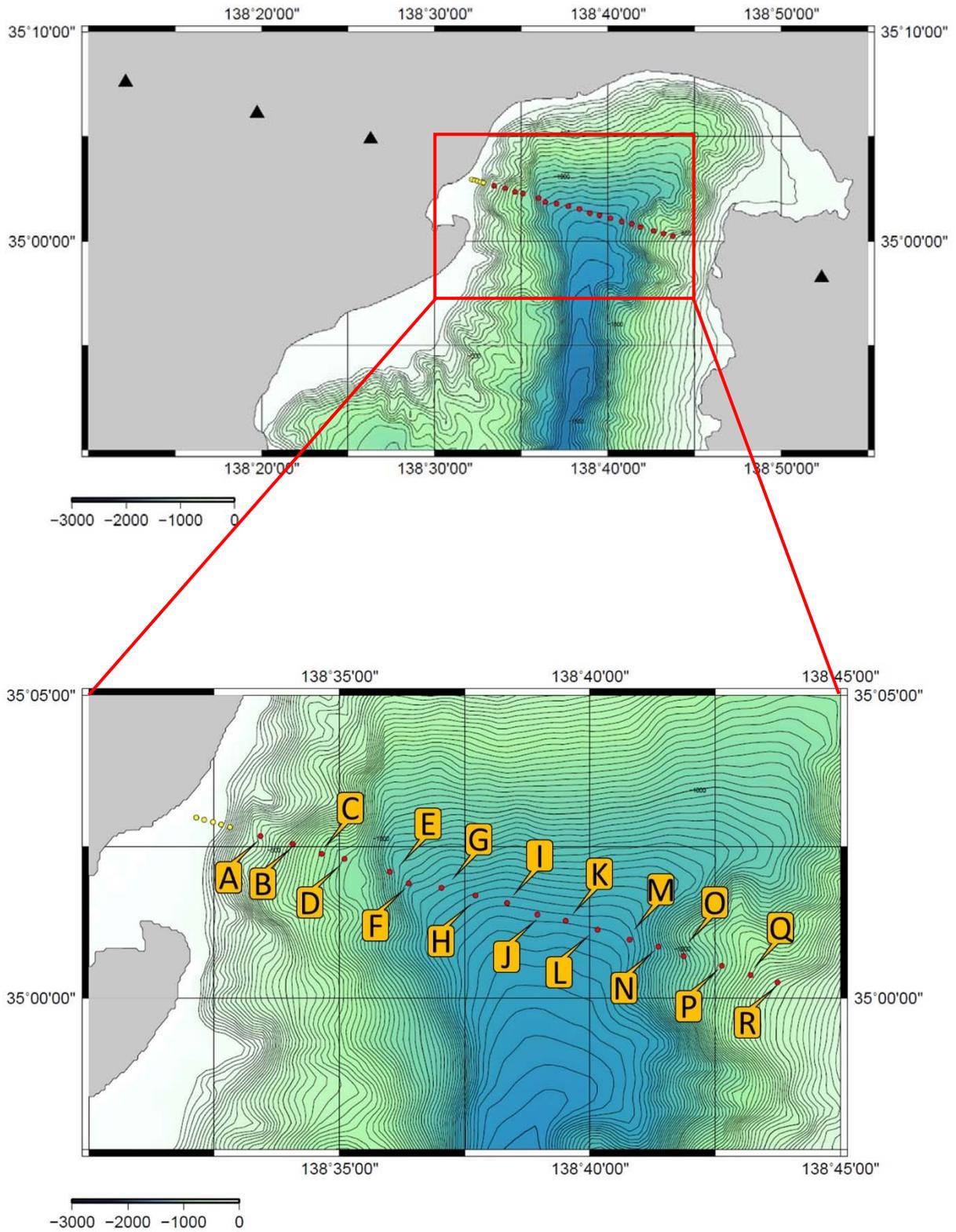


図3 OBS観測点配置図。

● : OBS観測点 (18台設置), ● : OBX観測点 (5台設置)

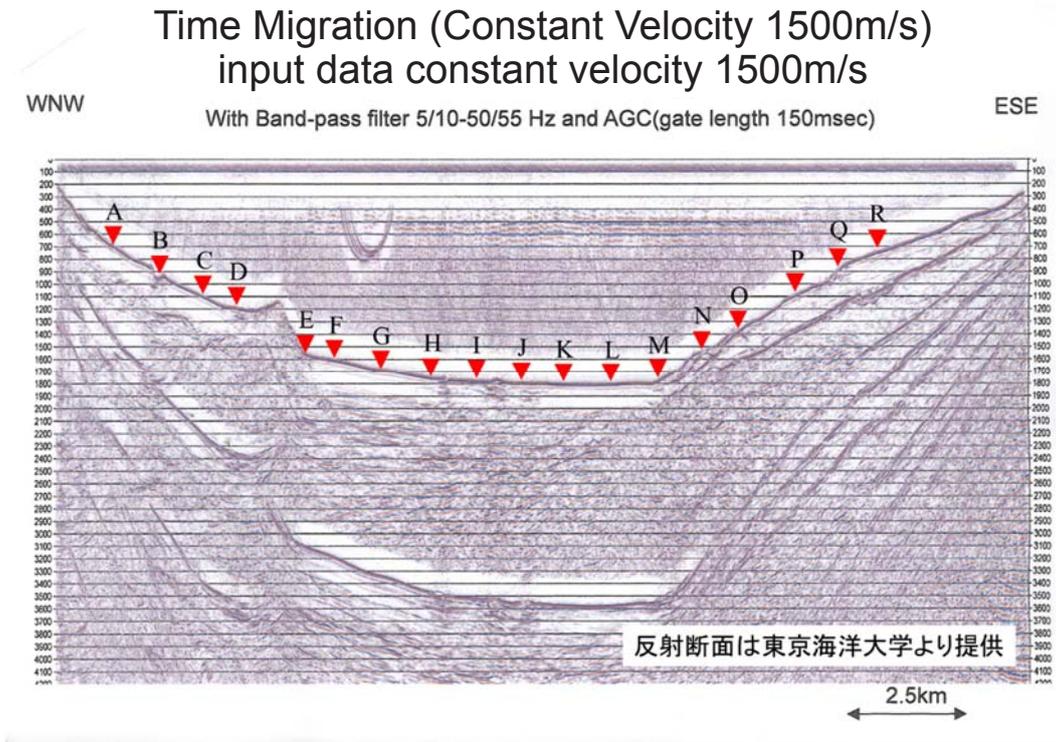


図4 OBS観測点位置を加えた測線下反射断面図。
 (反射断面は、東京海洋大学より提供されたもの)

(c) 業務の成果

本業務の成果で特筆する点として、台風24号が2018年10月1日未明に駿河湾付近を通過したことから、探査日程の変更が生じた。また、駿河湾の海況が大荒れとなったことから、18台のOBSのうち7台に影響が出た。

1) 台風24号の影響について

本事業で展開・設置したOBSについて、台風24号の影響(図5)により表6に示すOBS6台がデータを得ることができなかった。台風で被った影響について、その詳細は以下の通りである。

a) OBSの回収はできたが、データが得られない(探査前に浮上した。)

→台風通過時(探査前)にOBSのアンカー切り離し部が物理的な作用によって引きちぎられることによって浮上し、漂流の上、海岸に漂着した。(図7・図8参照)

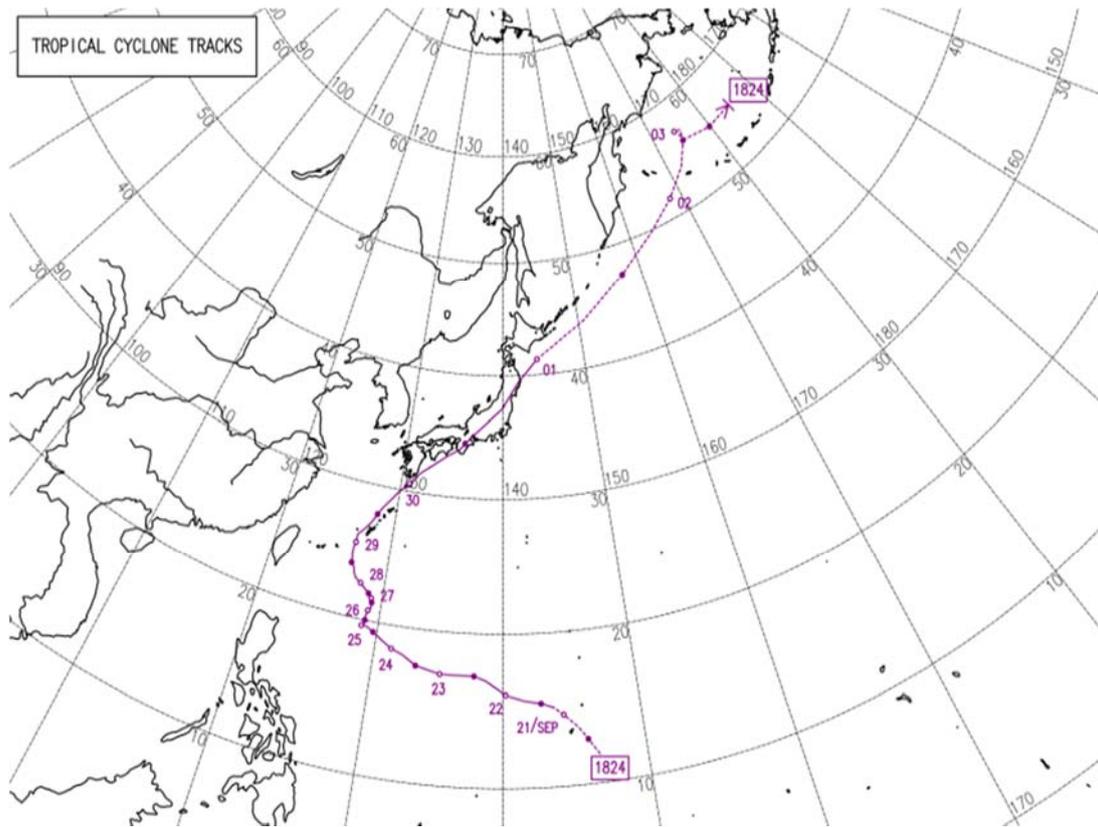
b) OBSの回収ができない(データの回収ができない。)

→応答はあるが海底からOBSが浮上しない、またはOBSが行方不明のため回収ができない。

c) OBSが海底で移動したため、データの信頼性が低い、ノイズが大きい。

→OBS設置時の測量位置と回収時の測量位置が異なり、OBSが移動した可能性がある。(図9参照)

異常となったOBSの詳細を表6に、またその位置をまとめたものを図10に示す。



※台風 24 号が静岡上空を通過した時間がおおよそ 2018 年 9 月 30 日の 18 時から 2018 年 10 月 1 日の 6 時にあたる。この時間帯の台風の状況は以下の通りである。

- ・ 中心気圧：955～970 hPa
- ・ 最大風速：35～40 m/s
- ・ 暴風域半径：SE, 280 km NW, 150 km
- ・ 強風域半径：SE, 650 km NW, 440 km
- ・ 連続雨量（30 日 1 時～1 日 9 時）

伊豆 : 177 mm
 静岡東部 : 282 mm
 静岡中部 : 300 mm
 静岡西部 : 239 mm

図 5 台風 24 号の進路と状況（国土交通省気象庁より）。

表 6 台風 24 号によってデータが回収できない等の異常が発生した OBS の詳細。

観測点	異常内容	OBSの状態	異常
FUJ04F	設置地点のずれ	泥の付着	③
FUJ04G	勝手浮上	切り離し部分に引きちぎられた痕跡	①
FUJ04H	勝手浮上	切り離し部分に引きちぎられた痕跡	①
FUJ04I	勝手浮上	切り離し部分に引きちぎられた痕跡	①
FUJ04J	トランスポンダの返信あり 浮上せず		②
FUJ04K	トランスポンダの返信なし 行方不明		②
FUK04L	トランスポンダの返信あり 浮上せず 設置地点のずれ		②・③



図 7 海岸に漂着した FUJ04I (10月2日)。

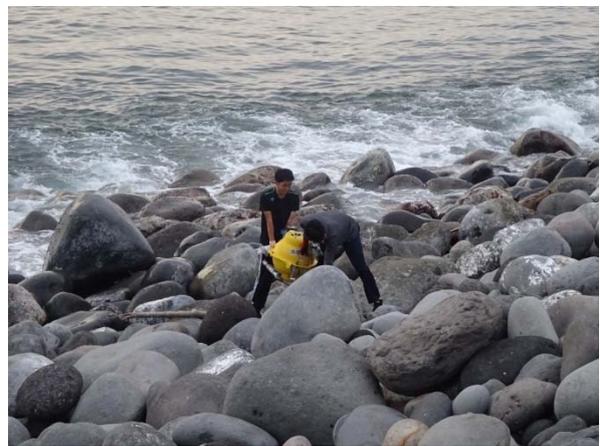
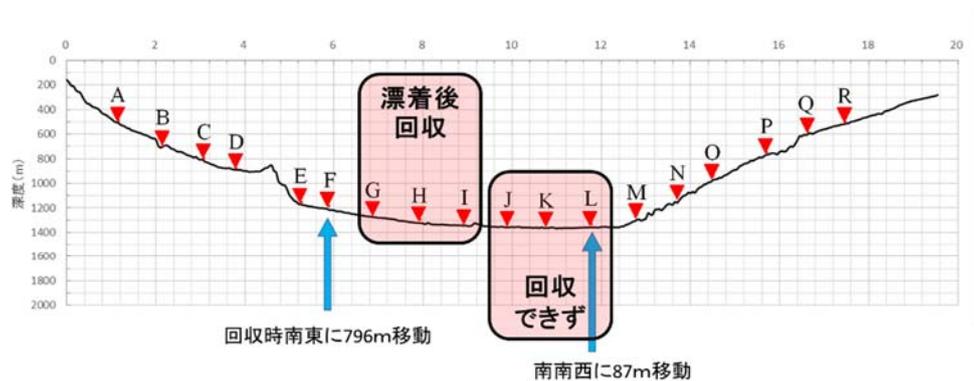


図 8 岩場に漂着した FUJ04G (10月3日)。



図 9 投入位置より南東方向に移動が確認され、回収された FUJ04F の状況。泥が大量に付着している状況から海底で押し流されたことが推測される。



OBSの回収状況

図 10 異常が発生した OBS の配置状況図。

図 10 に示すとおり、駿河湾の駿河トラフ底に設置された観測点 FUJ04G・FUJ04H・FUJ04I・FUJ04J・FUJ04K・FUJ04L の OBS でデータが得られなかった。また、観測点 FUJ04F では、データは得られたものの、測線上から南東方向に移動・押し流されたことから、解析に用いるには難があると判断された。以上、本事業では駿河湾西側斜面の観測点 FUJ04A・FUJ04B・FUJ04C・FUJ04D・FUJ04E、駿河湾東側斜面の観測点 FUJ04M・FUJ04N・FUJ04O・FUJ04P・FUJ04Q・FUJ04R の 11 点でデータ整理を行った。

2) 屈折法地震探査で得られた記録について

OBS18 台のうち、11 観測点で得られた OBS 記録について以下にまとめた。東京海洋大学練習船「神鷹丸 (986 トン)」による屈折法地震探査は、2018 年 10 月 2 日 23 時～10 月 3 日 05 時、ならびに 2018 年 10 月 3 日 21 時～10 月 4 日 03 時のそれぞれの間エアガンの発震が同じ測線で 2 往復にわたって実施された。以下、図 11 から図 22 で示す Record Section の例は、2018 年 10 月 2 日 23 時～10 月 3 日 05 時に実施されたエアガン発震の 1 往復分の記録についてまとめたものである。

図 11 は、観測点 FUJ04A の上下動成分 Record Section 記録例を示したものである。図中の(b)は、(a)から読み取られた初動について、その時刻と見かけ速度を加えたものである。横軸の距離は、測線の西端を 0 km、東端が 19.82 km である。観測点 FUJ04A の測線上の位置は西端から 1.16 km である。エアガンのショット数は、788 ショットである。測線全体に渡ってエアガンの震動は達しているが、明瞭な初動は横軸距離約 12 km 付近までしか追うことができない。見かけ速度は、

第 1 層 (表層)	西側	2.4 km/sec	東側	1.8 km/sec
第 2 層	西側	3.8 km/sec	東側	2.5 km/sec
第 3 層	西側	記録無し	東側	3.6 km/sec
第 4 層	西側	記録無し	東側	5.2 km/sec

であった。横軸距離 12 km 以降は、初動が急激に不明瞭となるが、後続波は明瞭である。今後、他の観測点と併せて解析を行っていく。

図 12 は、観測点 FUJ04B の上下動成分 Record Section 記録例を示したものである。図中の(b)は、(a)から読み取られた初動について、その時刻と見かけ速度を加えたものである。観測点 FUJ04B の測線上の位置は西端から 2.17 km である。測線全体に渡ってエアガンの震動は達しているが、明瞭な初動は、横軸距離約 12 km 付近までしか確認することができない。見かけ速度は、

第 1 層 (表層)	西側	3.2 km/sec	東側	2.1 km/sec
第 2 層	西側	5.2 km/sec	東側	2.7 km/sec
第 3 層	西側	記録無し	東側	4.0 km/sec
第 4 層	西側	記録無し	東側	6.1 km/sec

であった。横軸距離 12 km 以降は、初動が急激に不明瞭となるが後続波が届いている。

図 13 は、観測点 FUJ04C の上下動成分 Record Section 記録例を示したものである。図中の(b)は、(a)から読み取られた初動について、その時刻と見かけ速度を加えたものである。観測点 FUJ04C の測線上の位置は西端から 3.09 km である。測線全体に渡ってエアガンの震動は達している。明瞭な初動は、横軸距離約 19 km 付近まで確認することができたが、約 12~13 km と約 17~18 km 付近では初動を読み取ることができなかつた。見かけ速度は、

第 1 層 (表層)	西側	2.5 km/sec	東側	1.9 km/sec
第 2 層	西側	3.4 km/sec	東側	2.7 km/sec
第 3 層	西側	6.0 km/sec	東側	5.0 km/sec
第 4 層	西側	記録無し	東側	6.0 km/sec
第 5 層	西側	記録無し	東側	6.8 km/sec <

であった。

図 14 は、観測点 FUJ04D の上下動成分 Record Section 記録例を示したものである。図中の(b)は、(a)から読み取られた初動について、その時刻と見かけ速度を加えたものである。観測点 FUJ04D の測線上の位置は西端から 3.82 km である。測線全体に渡ってエアガンの震動は達している。初動は、横軸距離約 19 km 付近まで明瞭に確認することができたが、約 17~18 km 付近では初動を読み取ることができなかつた。見かけ速度は、

第 1 層 (表層)	西側	2.5 km/sec	東側	2.1 km/sec
第 2 層	西側	3.4 km/sec	東側	2.6 km/sec
第 3 層	西側	6.0 km/sec	東側	3.1 km/sec
第 4 層	西側	記録無し	東側	5.8 km/sec
第 5 層	西側	記録無し	東側	6.8 km/sec <

であった。

図 15 は、観測点 FUJ04E の上下動成分 Record Section 記録例を示したものである。図中の(b)は、(a)から読み取られた初動について、その時刻と見かけ速度を加えたものである。観測点 FUJ04E の測線上の位置は西端から 5.29 km である。測線全体に渡ってエアガンの震動は達している。初動は、横軸距離約 19 km 付近まで明瞭に確認することができたが、約 16~18 km 付近は初動が読み取ることができなかった。見かけ速度は、

第 1 層 (表層)	西側	2.5 km/sec	東側	1.9 km/sec
第 2 層	西側	3.4 km/sec	東側	2.5 km/sec
第 3 層	西側	6.0 km/sec	東側	4.5 km/sec
第 4 層	西側	記録無し	東側	5.9 km/sec
第 5 層	西側	記録無し	東側	6.8 km/sec <

であった。

図 16 は、観測点 FUJ04F の上下動成分 Record Section 記録例を示したものである。この観測点は、上述したように、台風 24 号の影響で探査実施前に海底で移動した（押し流された）可能性があり、回収時は投入位置よりも南東へ約 800 m 離れた位置で発見された。また、OBS 内部にも大量の泥が混入していた（図 9 参照）。図 16 に示すように記録は他の観測点と比較するとノイズが大きい。このことから、OBS は正常な姿勢を維持できていない可能性がある。他の観測点のデータの状況に合わせて評価し、解析可能であれば今後整理をする予定である。

図 17 は、観測点 FUJ04M の上下動成分 Record Section 記録例を示したものである。図中の(b)は、(a)から読み取られた初動について、その時刻と見かけ速度を加えたものである。観測点 FUJ04M の測線上の位置は西端から 12.80 km である。測線全体に渡ってエアガンの震動は達している。初動は、横軸距離約 2~19 km 付近まで明瞭に確認することができたが、約 3 km、約 4~8 km、約 16~17 km 付近は初動を読み取ることができなかった。見かけ速度は、

第 1 層 (表層)	西側	1.9 km/sec	東側	2.2 km/sec
第 2 層	西側	2.4 km/sec	東側	3.5 km/sec
第 3 層	西側	4.1 km/sec	東側	4.8 km/sec
第 4 層	西側	記録無し	東側	6.8 km/sec <

であった。

図 18 は、観測点 FUJ04N の上下動成分 Record Section 記録例を示したものである。図中の(b)は、(a)から読み取られた初動について、その時刻と見かけ速度を加えたものである。観測点 FUJ04N の測線上の位置は西端から 13.72 km である。測線全体に渡ってエアガンの震動は達している。初動は、横軸距離約 6~17 km 付近で明瞭に確認することができたが、約 7~8 km 付近は初動を読み取ることができなかった。見かけ速度は、

第 1 層 (表層)	西側	1.9 km/sec	東側	2.1 km/sec
第 2 層	西側	2.4 km/sec	東側	3.5 km/sec
第 3 層	西側	4.0 km/sec	東側	記録無し

であった。

図 19 は、観測点 FUJ04O の上下動成分 Record Section 記録例を示したものである。図中の(b)は、(a)から読み取られた初動について、その時刻と見かけ速度を加えたものである。観測点 FUJ04O の測線上の位置は西端から 14.52 km である。測線全体に渡ってエアガンの震動は達している。初動は、横軸距離約 6~18 km 付近まで明瞭に確認することができたが、約 7~8 km 付近は初動を読み取ることができなかった。見かけ速度は、

第 1 層 (表層)	西側	1.8 km/sec	東側	2.0 km/sec
第 2 層	西側	2.2 km/sec	東側	3.8 km/sec
第 3 層	西側	4.0 km/sec	東側	記録無し
第 4 層	西側	5.0 km/sec	東側	記録無し

であった。

図 20 は、観測点 FUJ04P の上下動成分 Record Section 記録例を示したものである。図中の(b)は、(a)から読み取られた初動について、その時刻と見かけ速度を加えたものである。観測点 FUJ04P の測線上の位置は西端から 15.72 km である。測線全体に渡ってエアガンの震動は達している。初動は、横軸距離約 6~19 km 付近まで明瞭に確認することができたが、約 7~8 km と約 10~12 km 付近では初動を読み取ることができなかった。見かけ速度は、

第 1 層 (表層)	西側	1.8 km/sec	東側	1.8 km/sec
第 2 層	西側	2.2 km/sec	東側	3.8 km/sec
第 3 層	西側	4.2 km/sec	東側	記録無し
第 4 層	西側	5.0 km/sec	東側	記録無し

であった。

図 21 は、観測点 FUJ04Q の上下動成分 Record Section 記録例を示したものである。図中の(b)は、(a)から読み取られた初動について、その時刻と見かけ速度を加えたものである。観測点 FUJ04Q の測線上の位置は西端から 16.63 km である。測線全体に渡ってエアガンの震動は達している。初動は、横軸距離約 6~19 km 付近で明瞭に確認することができたが、約 6~7 km、約 10 km、約 12~13 km 付近では初動を読み取ることができなかった。見かけ速度は、

第 1 層 (表層)	西側	1.8 km/sec	東側	1.8 km/sec
第 2 層	西側	2.4 km/sec	東側	3.6 km/sec
第 3 層	西側	4.2 km/sec	東側	記録無し
第 4 層	西側	5.5 km/sec	東側	記録無し

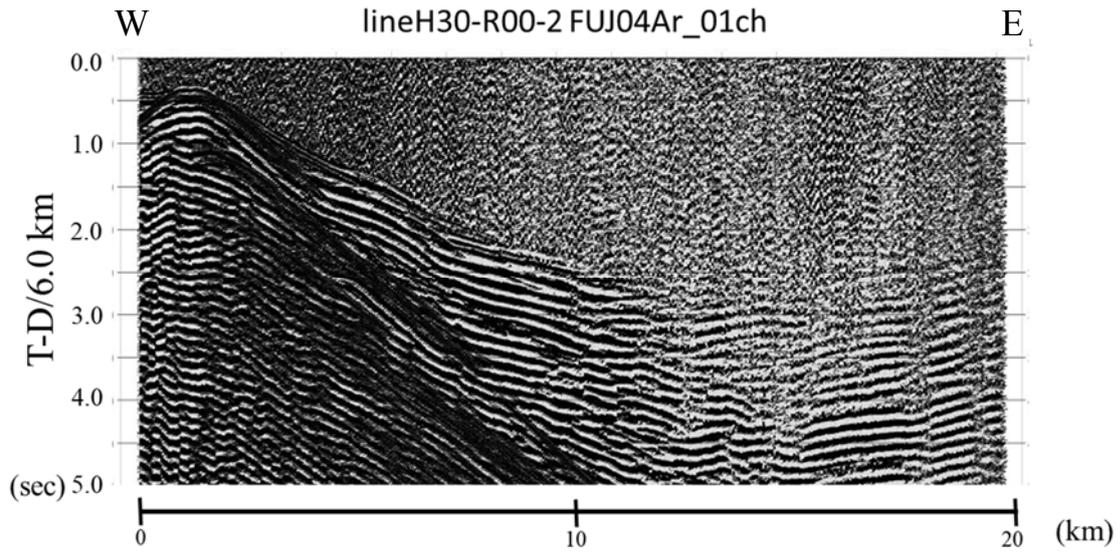
であった。

図 22 は、観測点 FUJ04R の上下動成分 Record Section 記録例を示したものである。図中の(b)は、(a)から読み取られた初動について、その時刻と見かけ速度を加えたものである。観測点 FUJ04R の測線上の位置は西端から 17.48 km である。測線全体に渡ってエアガンの震動は達し

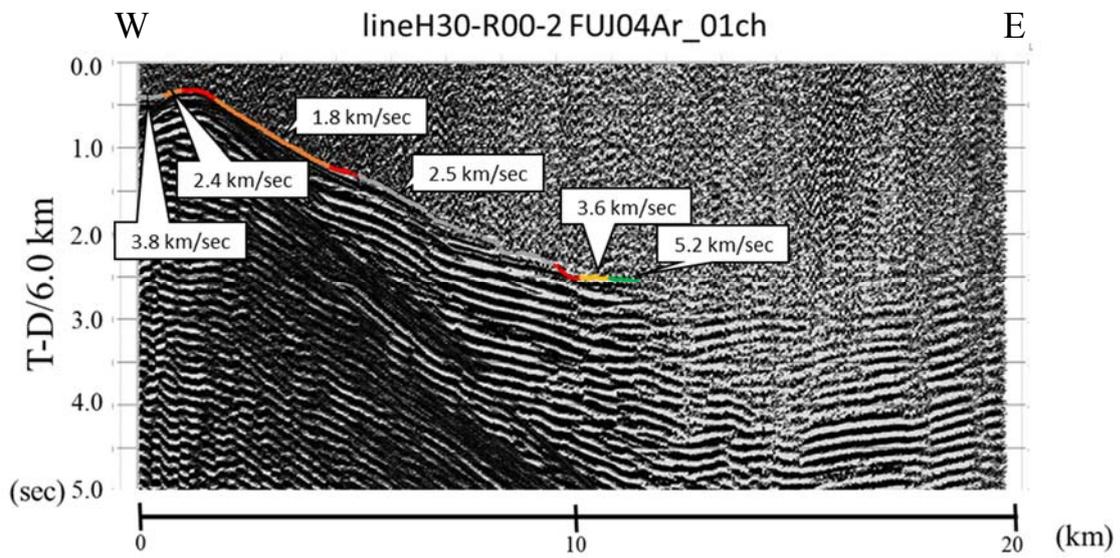
ている。初動は、横軸距離約 6~19 km 付近まで明瞭に確認することができたが、約 7~8 km、約 13~14 km 付近では初動を読み取ることができなかった。見かけ速度は、

第 1 層 (表層)	西側 1.8 km/sec	東側 1.8 km/sec
第 2 層	西側 2.4 km/sec	東側 3.6 km/sec
第 3 層	西側 4.2 km/sec	東側 記録無し
第 4 層	西側 5.6 km/sec	東側 記録無し

であった。



(a)

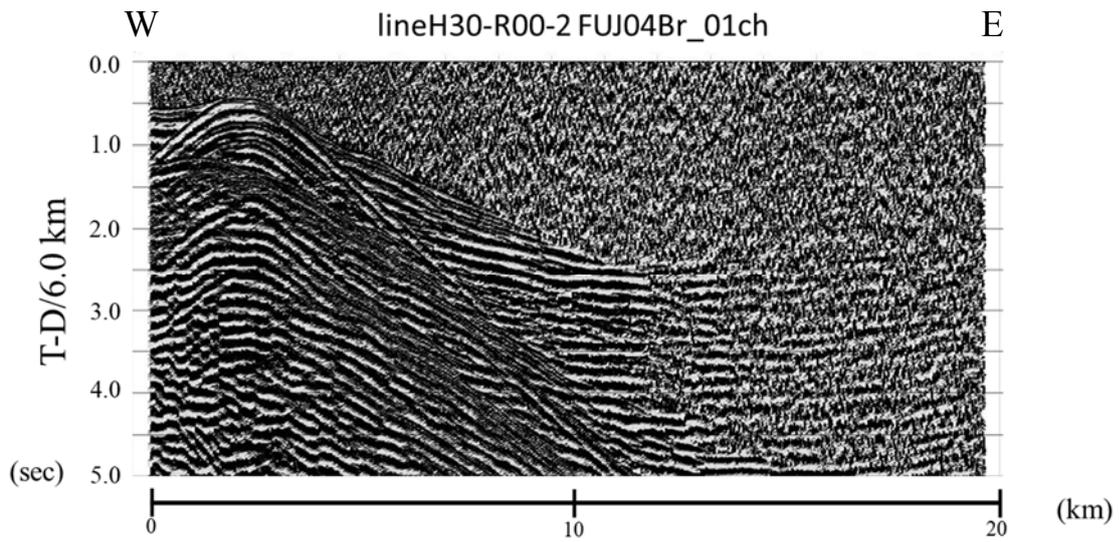


(b)

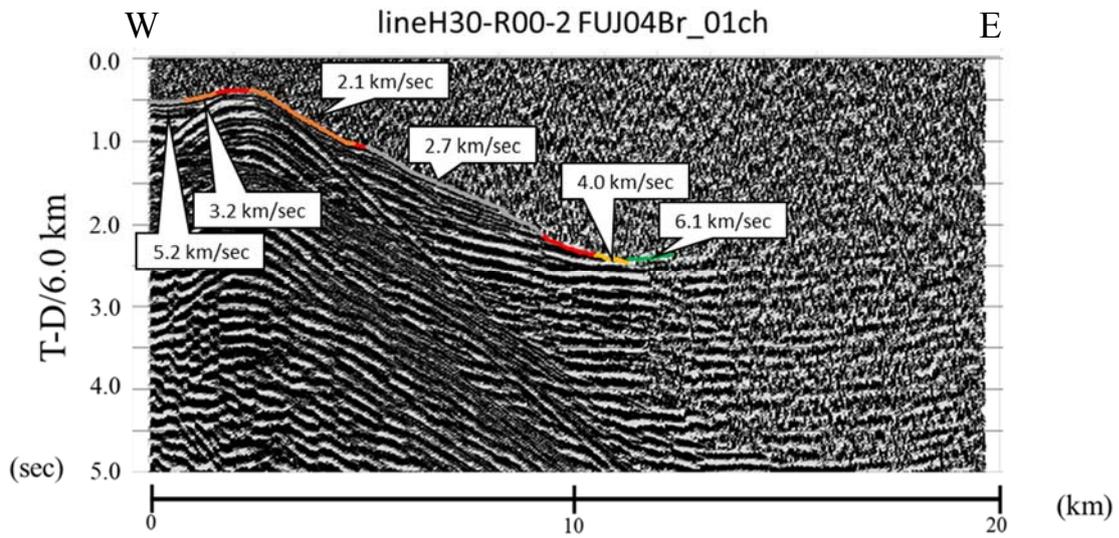
図 11 平成 30 年度 R001-2 測線における観測点 FUJ04A の Record Section の例(上下動成分)。

(a) : 観測点 FUJ04A の Record Section。

(b) : (a)の Record Section から初動の見かけ速度を加筆したもの。



(a)

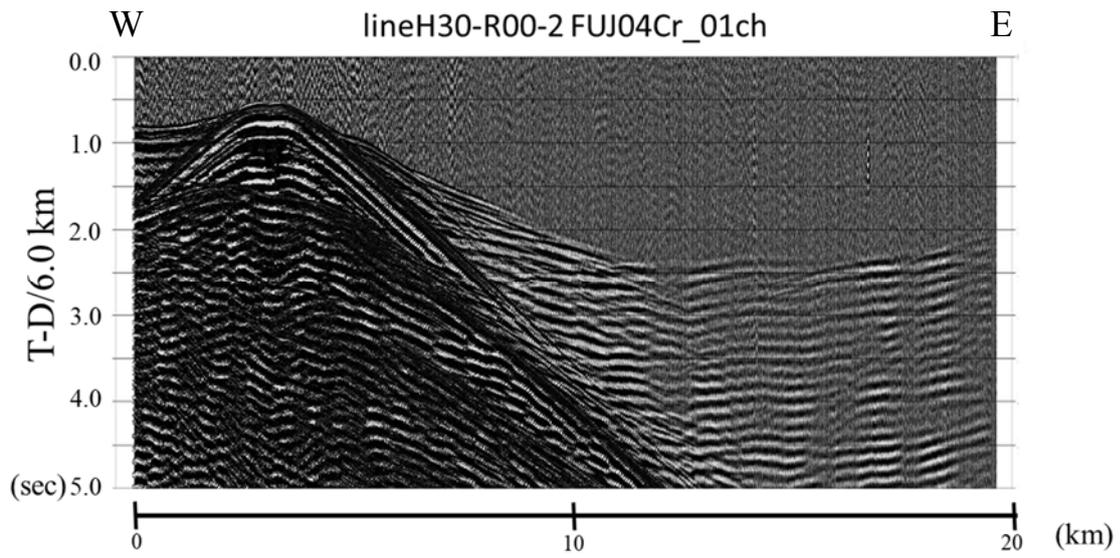


(b)

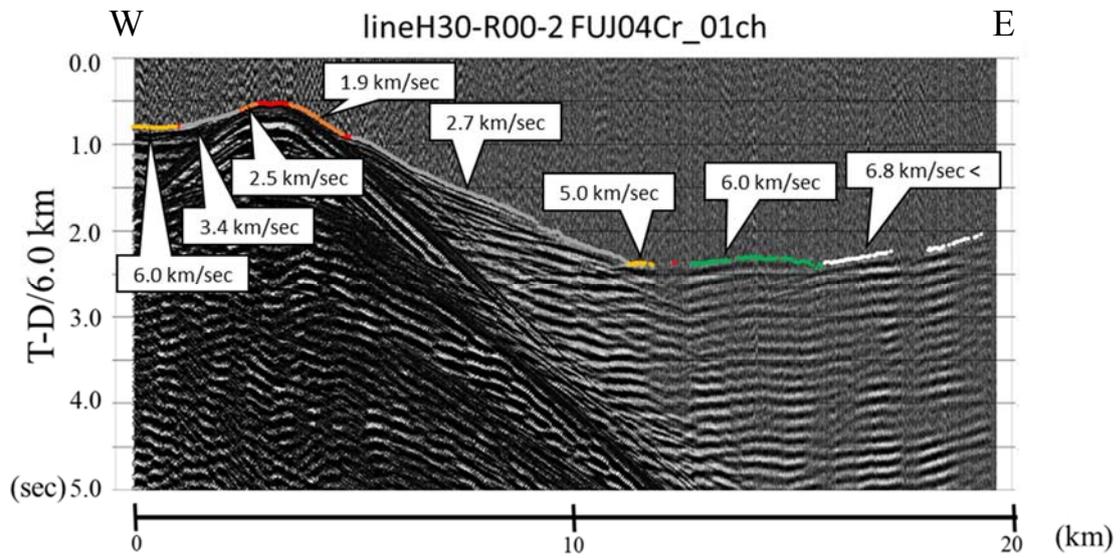
図 12 平成 30 年度 R001-2 測線における観測点 FUJ04B の Record Section の例(上下動成分)。

(a) : 観測点 FUJ04B の Record Section。

(b) : (a)の Record Section から初動の見かけ速度を加筆したもの。



(a)

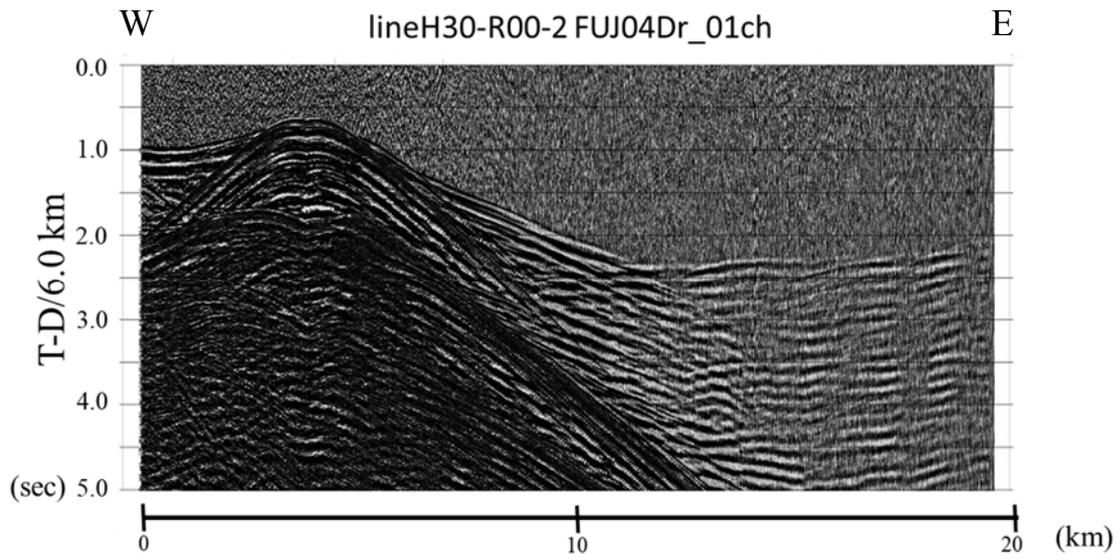


(b)

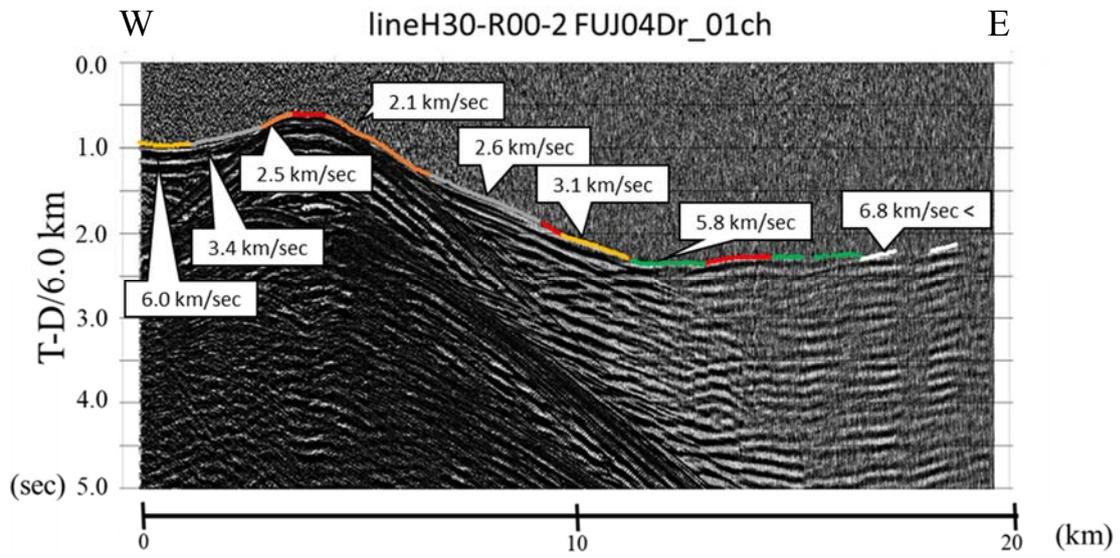
図 13 平成 30 年度 R001-2 測線における観測点 FUJ04C の Record Section の例(上下動成分)。

(a) : 観測点 FUJ04C の Record Section。

(b) : (a)の Record Section から初動の見かけ速度を加筆したもの。



(a)

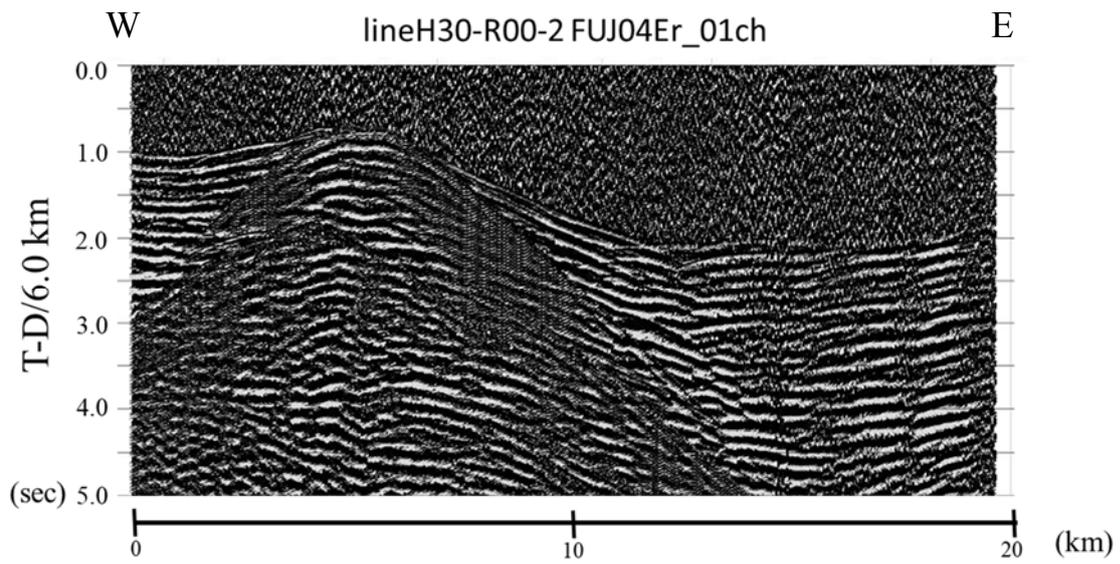


(b)

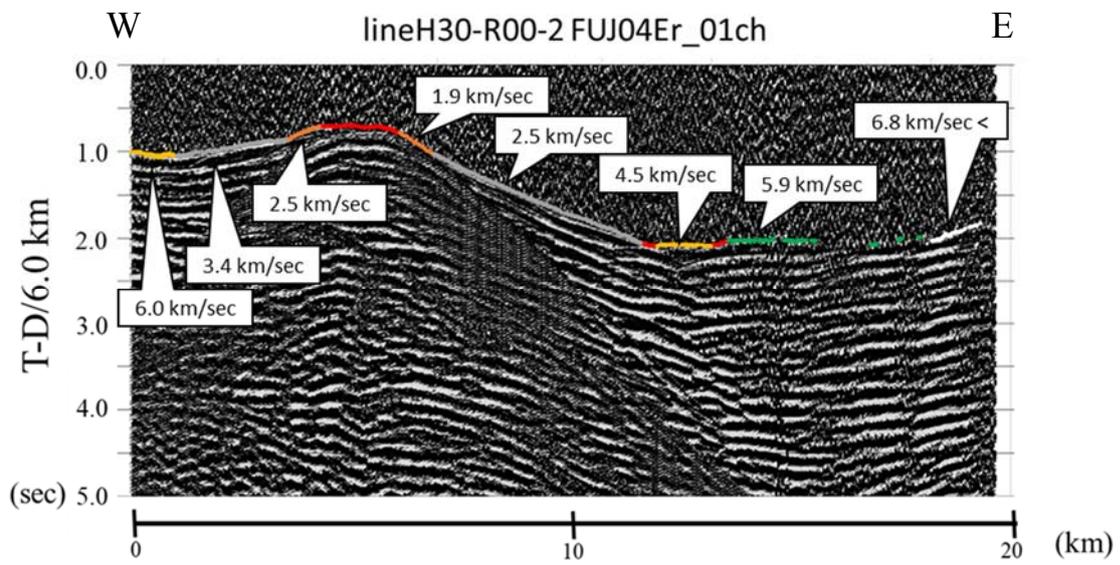
図 14 平成 30 年度 R001-2 測線における観測点 FUJ04D の Record Section の例(上下動成分)。

(a) : 観測点 FUJ04D の Record Section。

(b) : (a)の Record Section から初動の見かけ速度を加筆したもの。



(a)



(b)

図 15 平成 30 年度 R001-2 測線における観測点 FUJ04E の Record Section の例(上下動成分)。

(a) : 観測点 FUJ04E の Record Section。

(b) : (a)の Record Section から初動の見かけ速度を加筆したもの。

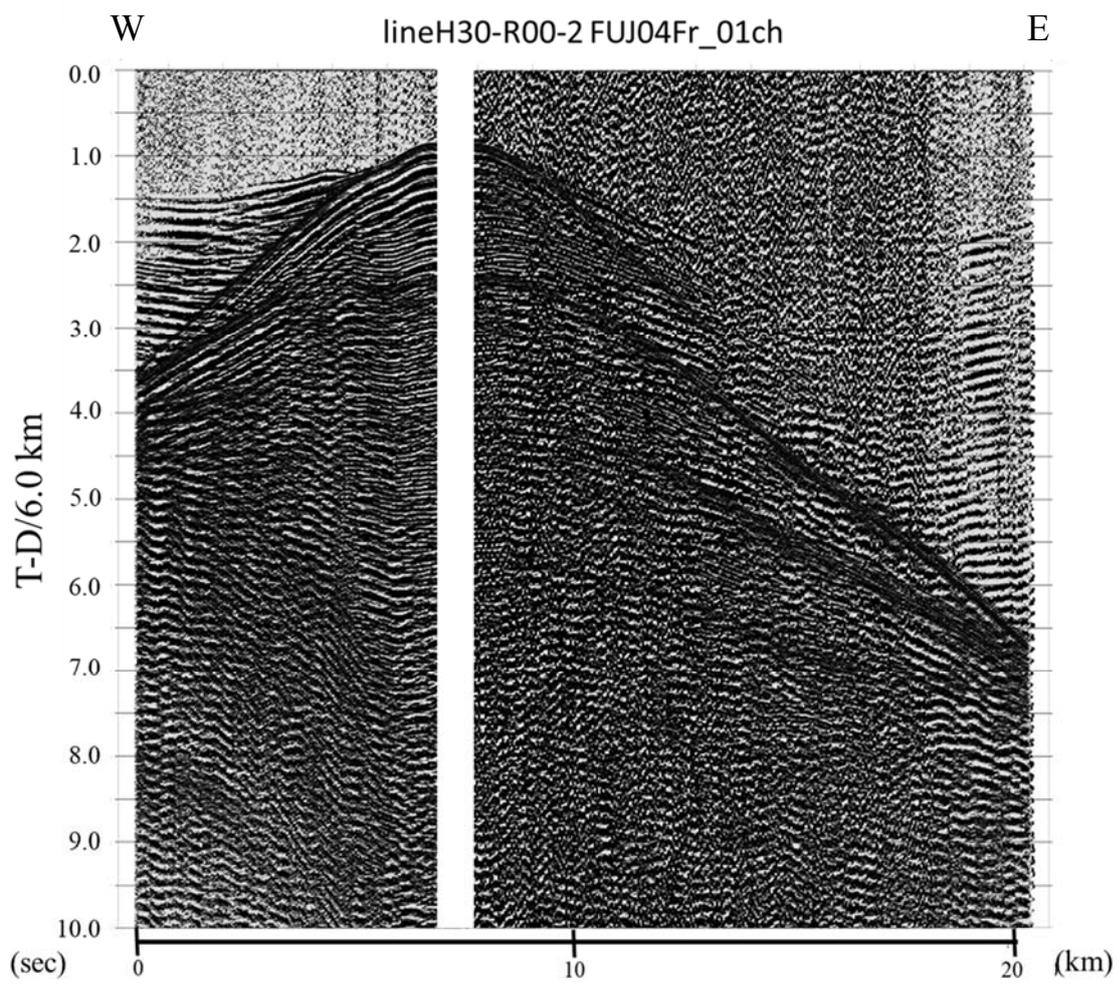
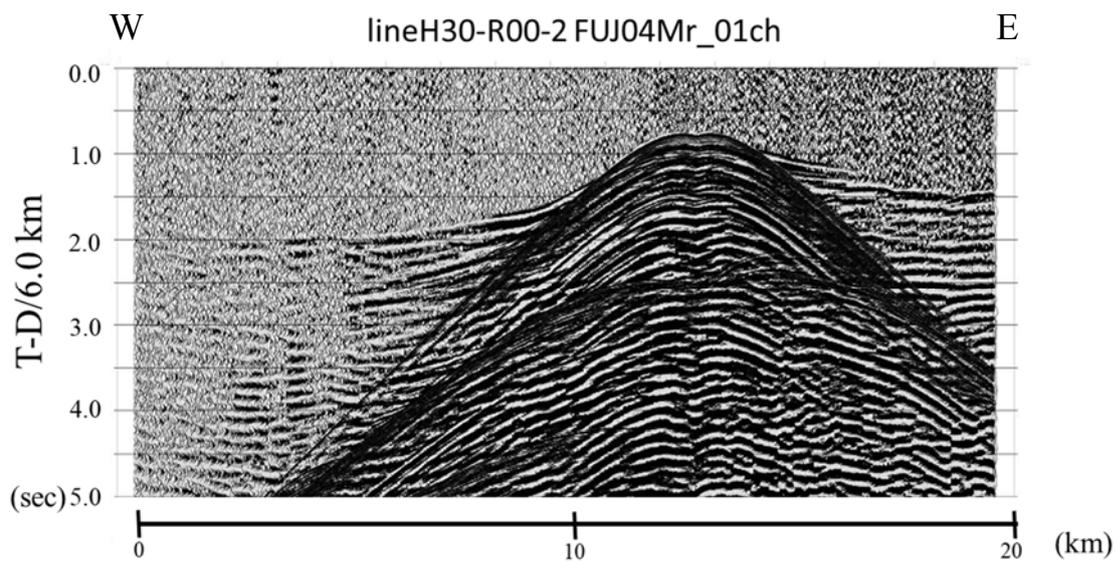
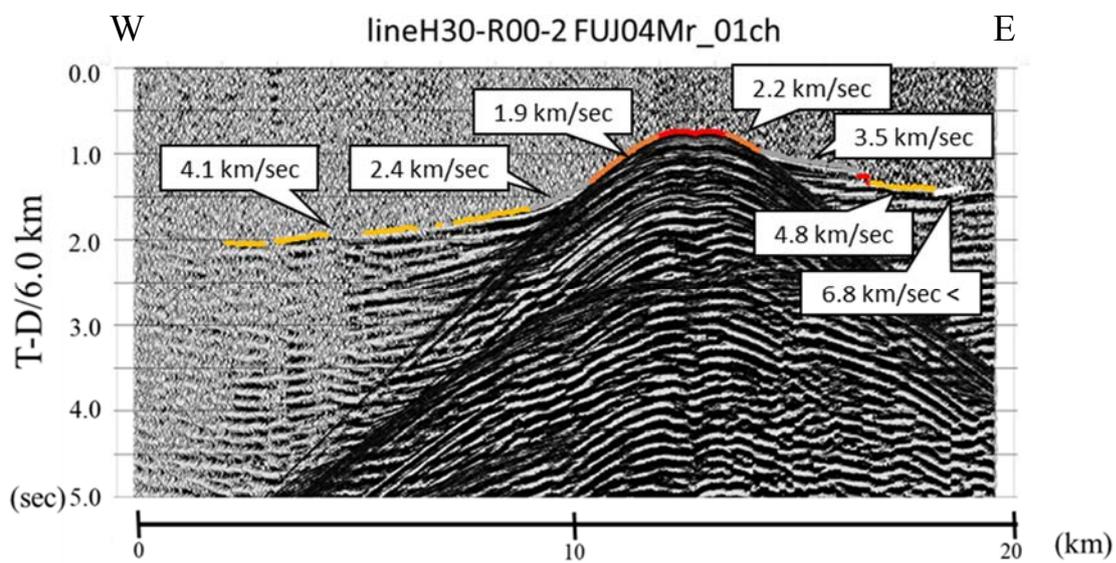


図 16 平成 30 年度 R001-2 測線における観測点 FUJ04F の Record Section の例(上下動成分)。



(a)

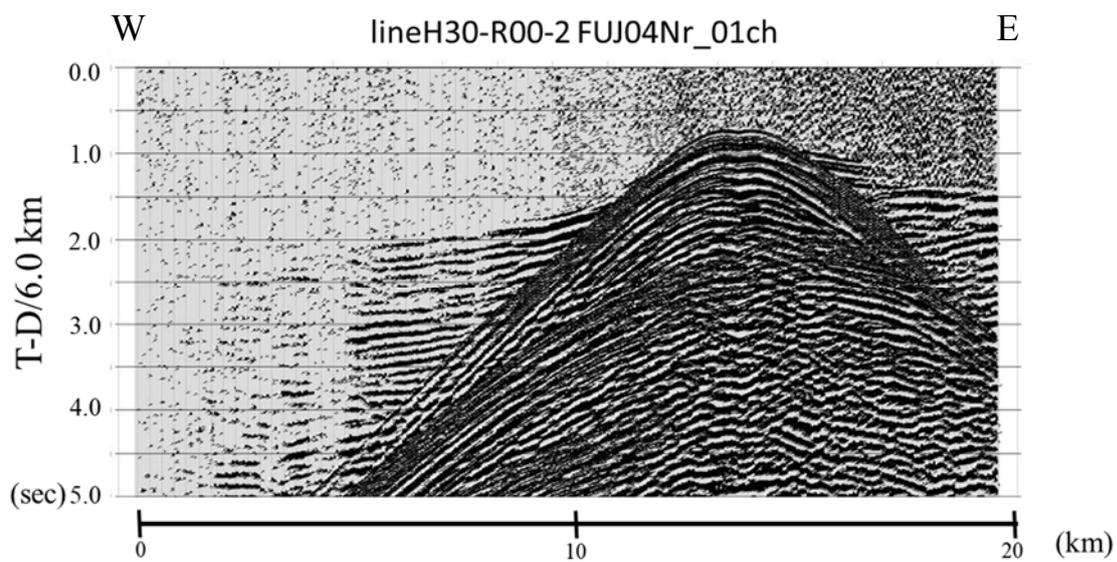


(b)

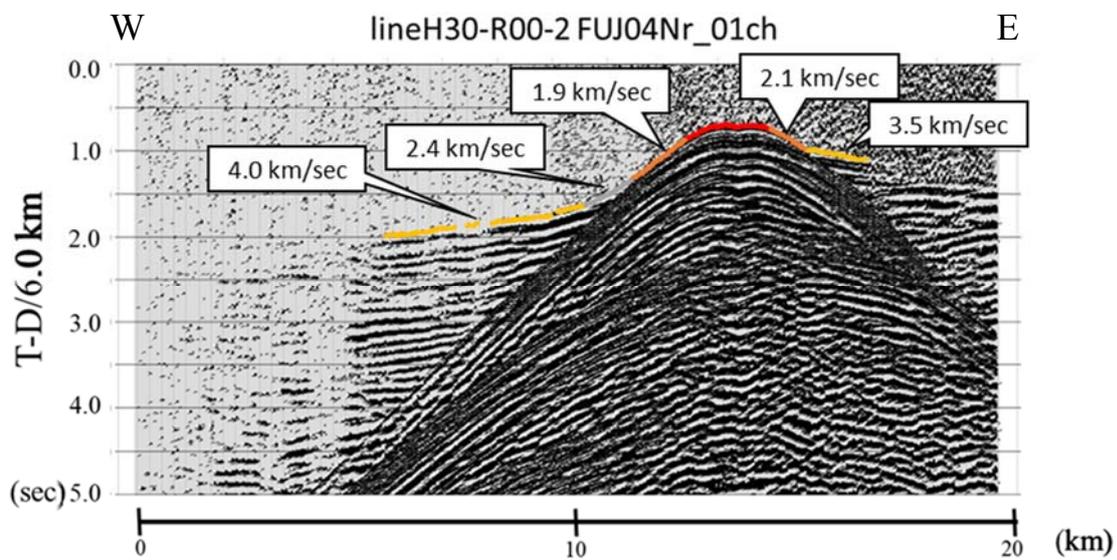
図 17 平成 30 年度 R001-2 測線における観測点 FUJ04M の Record Section の例(上下動成分)。

(a) : 観測点 FUJ04M の Record Section。

(b) : (a)の Record Section から初動の見かけ速度を加筆したもの。



(a)

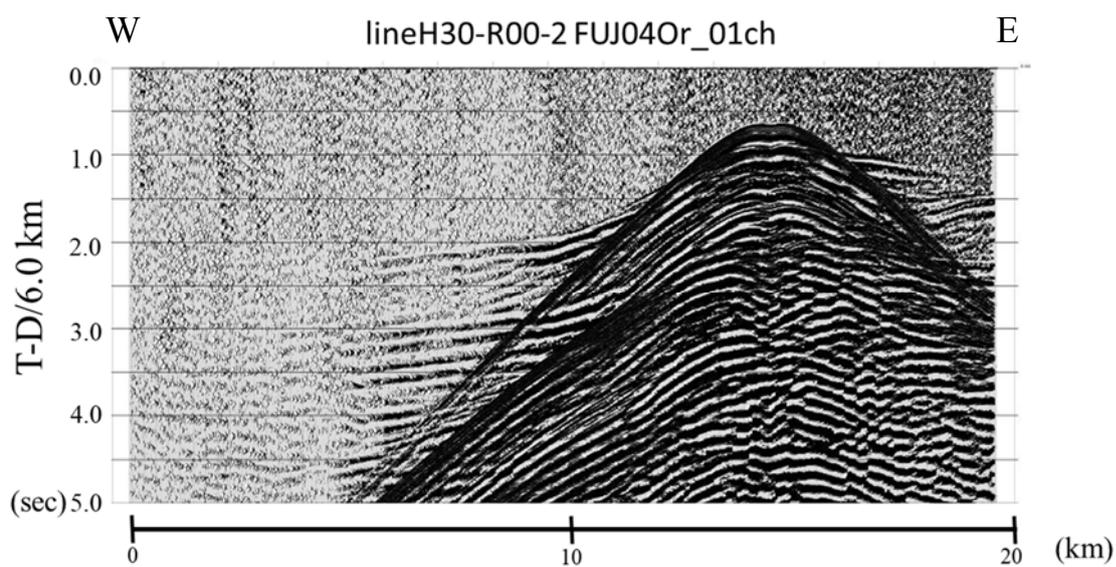


(b)

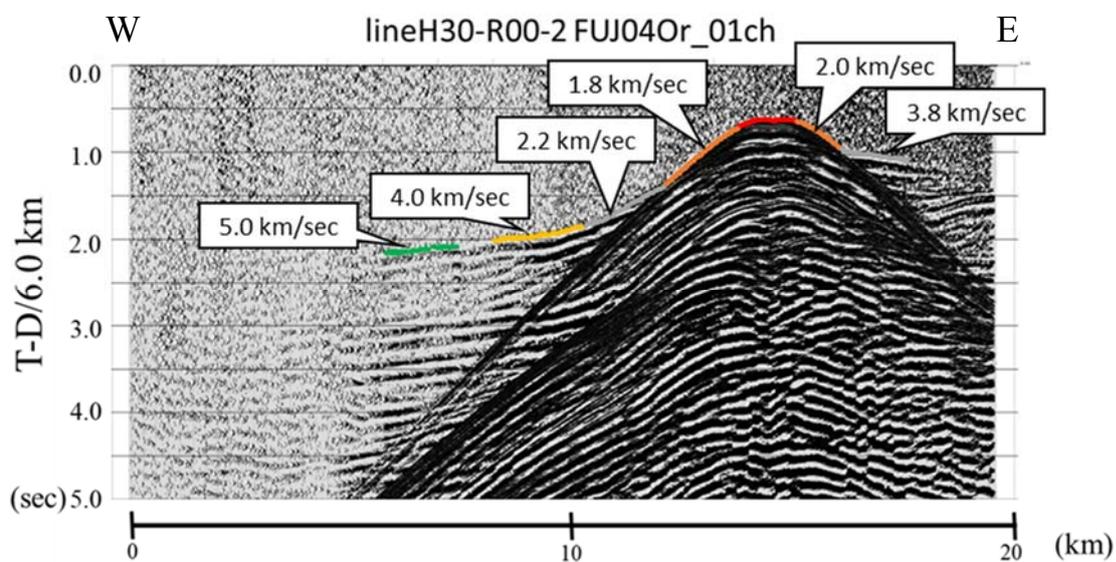
図 18 平成 30 年度 R001-2 測線における観測点 FUJ04N の Record Section の例(上下動成分)。

(a) : 観測点 FUJ04N の Record Section。

(b) : (a)の Record Section から初動の見かけ速度を加筆したもの。



(a)

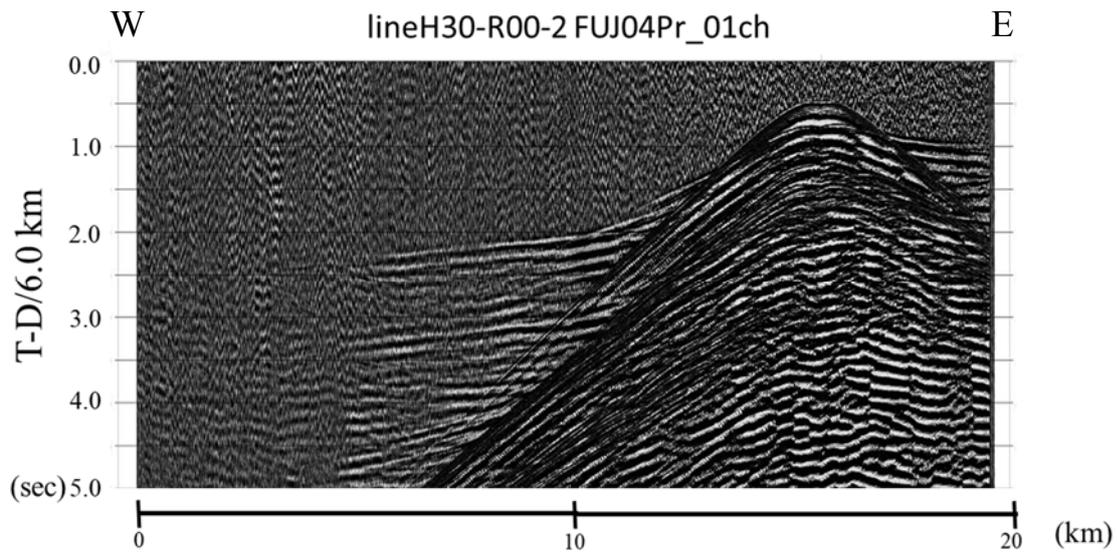


(b)

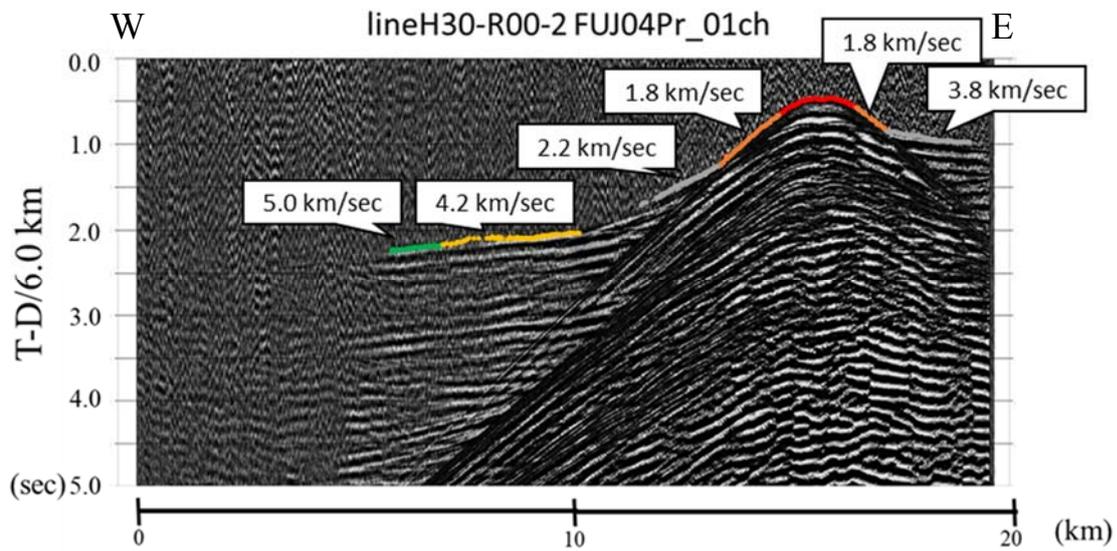
図 19 平成 30 年度 R001-2 測線における観測点 FUJ040 の Record Section の例(上下動成分)。

(a) : 観測点 FUJ040 の Record Section。

(b) : (a)の Record Section から初動の見かけ速度を加筆したもの。



(a)

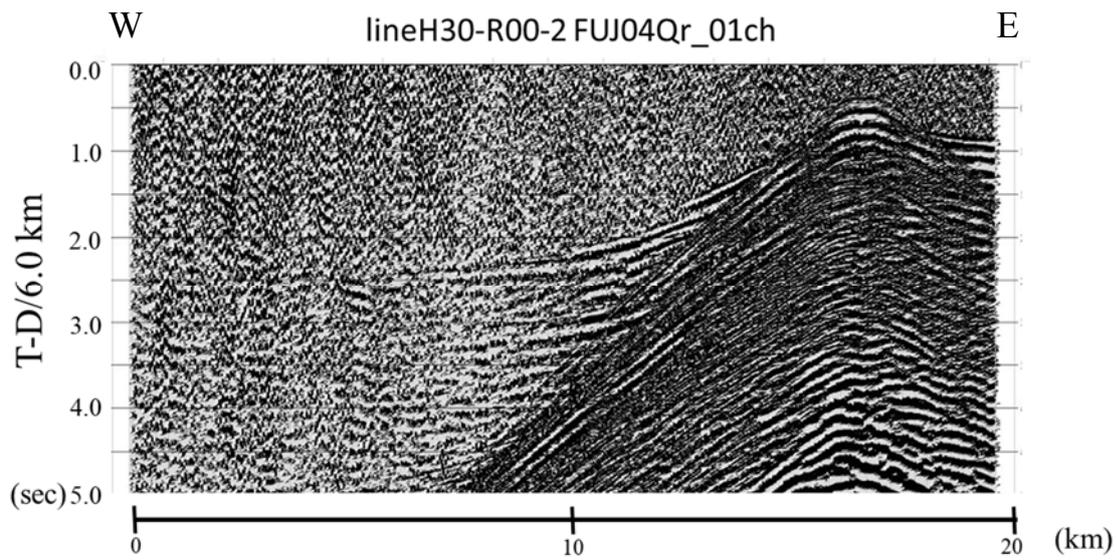


(b)

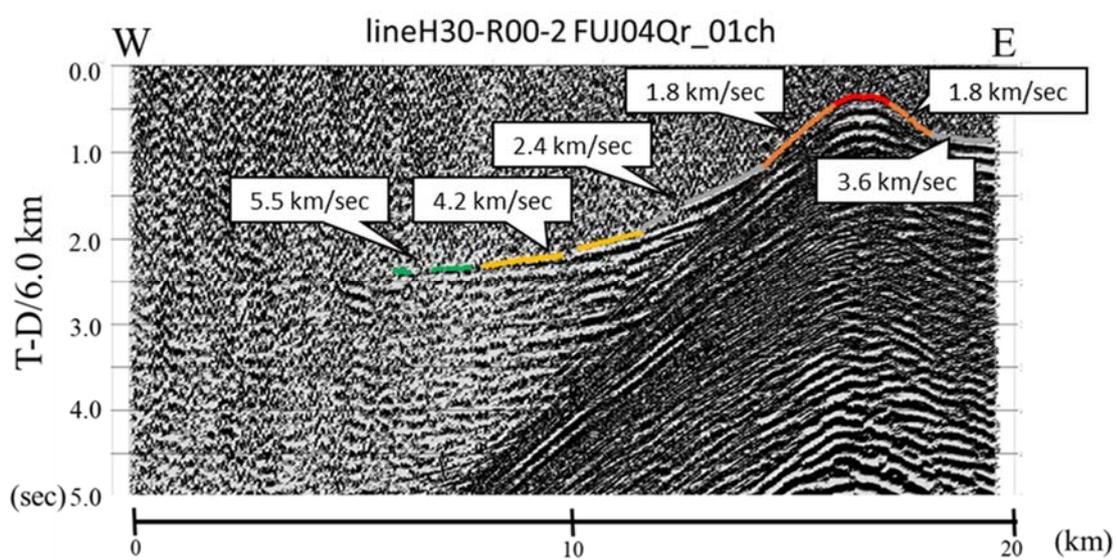
図 20 平成 30 年度 R001-2 測線における観測点 FUJ04P の Record Section の例(上下動成分)。

(a) : 観測点 FUJ04P の Record Section。

(b) : (a)の Record Section から初動の見かけ速度を加筆したもの。

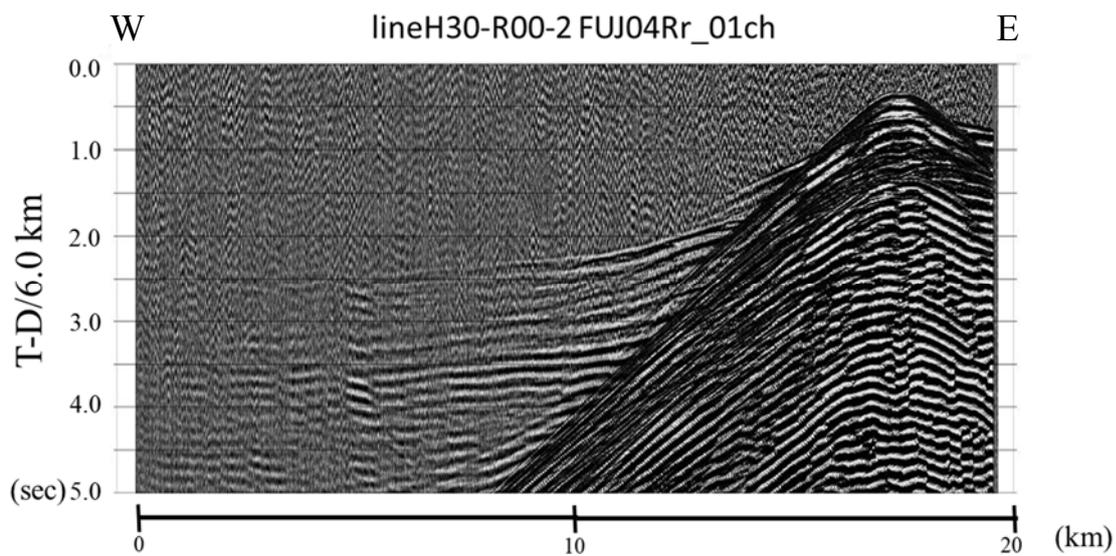


(a)

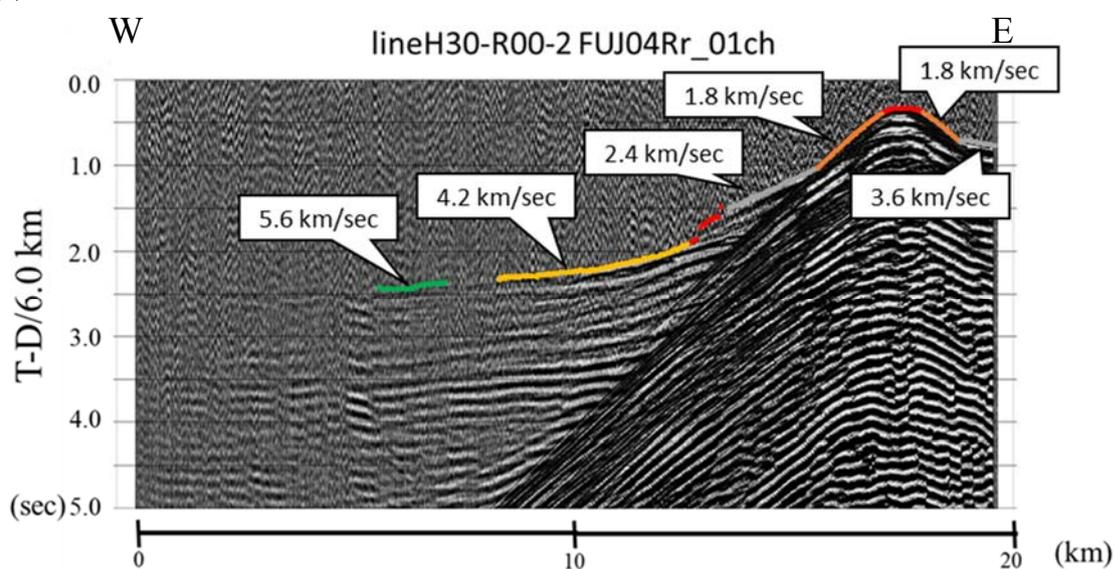


(b)

図 21 平成 30 年度 R001-2 測線における観測点 FUJ04Q の Record Section の例(上下動成分)。
 (a) : 観測点 FUJ04Q の Record Section。
 (b) : (a)の Record Section から初動の見かけ速度を加筆したもの。



(a)



(b)

図 22 平成 30 年度 R001-2 測線における観測点 FUJ04R の Record Section の例(上下動成分)。

(a) : 観測点 FUJ04R の Record Section。

(b) : (a)の Record Section から初動の見かけ速度を加筆したもの。

以上の Record Section の初動をまとめた走時曲線を図 23 に示す。初動時間を見直さなければならぬ箇所も存在するが、全体的な傾向として

- a) 見かけ速度の傾きが揃っている。
- b) 走時延長線上の終端走時が揃う傾向にある。

等のことから、良好な記録であることが言える。

この走時曲線（図 23）から推定できる地下速度構造モデルの特徴を以下に示す。

- i) 東側の観測点 FUJ04M・N・O・P・Q・R では折れ曲りの様子から 5 層構造、西側の観測点 FUJ04A・B・C・D・E では 3 層構造が確認できる。
- ii) 観測点 FUJ04M・N・O・P・Q・R の初動は、測線距離約 6 km 付近で確認できなくなる。これは、この位置が測線西側斜面の立ち上がる場所にあたることから、地形によるものである。
- iii) 西側の観測点 FUJ04A・B・C・D・E の見かけ速度は、東側の観測点 FUJ04M・N・O・P・Q・R の見かけ速度よりも早いことから、測線の地下速度モデルは東側から西側に向かって下り傾斜していることが推定される。
- iv) 観測点 FUJ04C・D・E の最も深い層の見かけ速度が急激に早くなる。この原因は、構造の変化によるものか、または速度の速い層によるものかは、陸域の人工地震探査の結果と併せて、解析をする必要がある。

図 24 は、各観測点直下の 1 次速度構造モデルをまとめたものである。現状では大まかなものではあるが、第 1 層（表層）の厚さについては、図 4 の反射断面に当てはめるとおおよそ合致する。海底面の傾斜が大きいため、各層の見かけ速度から求める真の速度は、まだ決定的ではないが、平均から算出すると

第 1 層（表層）	1.9 km/sec
第 2 層	2.6 km/sec
第 3 層	4.1 km/sec
第 4 層	西側 5.7 km/sec
第 5 層	西側 6.8 km/sec<

となった。

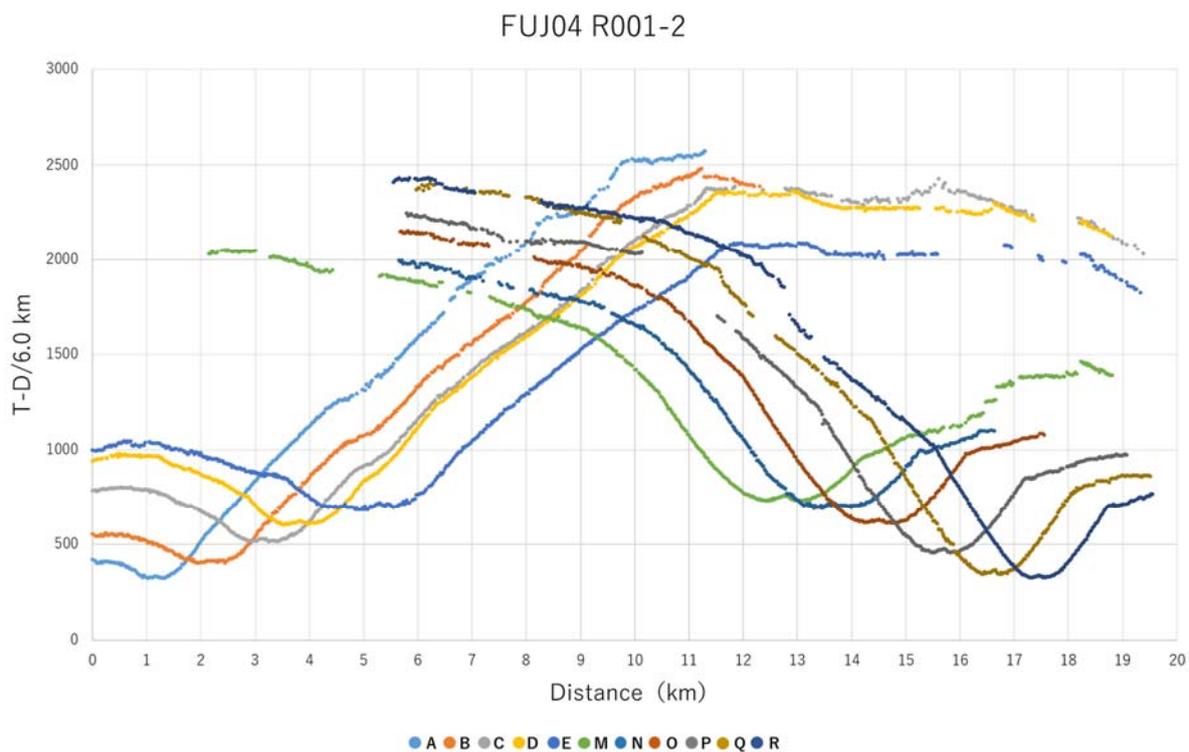


図 23 観測点 FUJ04A・B・C・D・E・M・N・O・P・Q・R の走時曲線。
時間軸は、Reduce Travel Time (6.0 km/sec)で示されている。

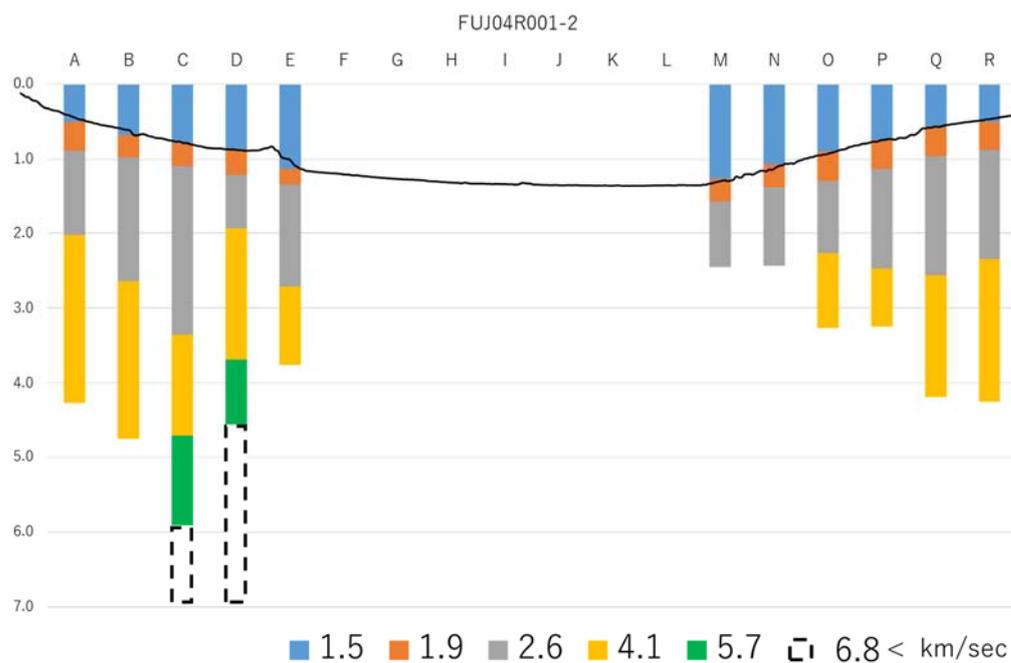


図 24 観測点 FUJ04A・B・C・D・E・M・N・O・P・Q・R それぞれ直下の
1次速度構造モデル。

(d) 結論ならびに今後の課題

台風 24 号の影響によって、6 観測点分の記録が得られず、特に測線中央部の記録が連続して抜けてしまう状況となった。しかし、測線の西側と東側について、良好な記録が得られた。解析は、現在のところ進行中である。平成 31 年度の予定としては、

- 1) 真の速度を的確に決める必要がある。これについては、東京海洋大学ならびに東海大学によって、本事業の本測線と平行する H29-L02, H30-02 の測線が展開されており、これらの速度構造解析結果を利用する。
- 2) 初動の読み取り精度の向上、後続波の利用、波形振幅の検討を行う。
- 3) 本測線では、2 往復分のデータが得られているため、これらのデータも利用する。
- 4) 速度構造モデルの構築では、波線追跡法を用いて行う。

等を実施する。

また、求められた速度構造モデル結果は、「(2-3) 駿河湾の海底地震観測」における震源決定にも活用する。

(e) 参考文献

- 青池 寛, 除 垣, 徳山英一, 平 朝彦 (2001) : 伊豆衝突帯テクトニクスと物質循環, 月刊地球号外, 33, 181-190.
- 長谷川功, 伊藤公介, 高橋学, 飯塚 進 (1989) : 上矢作~伊豆大島測線の地下構造上矢作~伊豆大島測線の地下構造, 地震学会講演予稿集 2, C06.
- 弘瀬冬樹, 中島淳一, 長谷川昭 (2008) : Double-Difference Tomography 法による関東地方の 3 次元地震波速度構造およびフィリピン海プレート形状の推定, 地震, 2, 60, 123-138.
- 伊神 輝 (1990) : 自然地震および人工地震による地殻, 上部マントル構造, 地学雑誌, 99, 1, 61-71.
- 岩崎貴哉 (1988) : 海底地震観測に基づく地下速度構造研究のための破線追跡プログラム, 地震 2, 41, 263-266.
- 地震調査研究推進本部 地震調査委員会 (2010) : 富士川河口断層帯の長期評価の一部改訂について, 報告書
- 海上保安庁 (1980) : 沿岸の海の基本図 (5 万分の 1) , 駿河湾北部, 1 海底地形図, 海図 第 6362 号.
- 海上保安庁水路部 (1997) : 駿河湾の海底地形, 地磁気, 重力調査, 地震予知連絡会会報, 87, 5-14.
- Kodaira S., A. Nakanishi, J. Park, A. Ito, T. Tsuru and Y. Kaneda (2003): Cyclic ridge subduction at an inter-plate licked zone off central Japan, Frontier Research on Earth Evolution, 1, 139-144.
- 三澤良文, 門田真人, 松井繁貴 (2007) : 駿河湾東部大陸斜面の海底地形地質と伊豆半島の基盤地質, 東海大学海洋研究所研究報告, 28, 1-12.
- 中村一明, 島崎邦彦 (1981) : 相模・駿河トラフと沈み込み, 科学, 51, 490-498
- 仲西理子, 塩原 肇, 日野亮太, 小平秀一, 金澤敏彦, 島村英紀 (1994) : 東海沖でのフィリピ

- ン海プレートの詳細な沈み込み形態の解明—エアガン-海底地震計探査による銭州海嶺南海トラフ東部の地殻構造—, 地震, 2, 47, 311-331.
- Nakao N., Baba, K. Imamura, K. Tsuruga, Y. Sekino, T. Hayashi, T. Aikawa, K. Nakata, T. Nishimiya, Y. Sawada, K. Kasahara, P. Yannis and H. Sato (2018): Seismic refraction velocity structure in the vicinity of Suruga Trough axial region reveal by OBS observations., AGU Fall Meeting, T41G-1640.
- 佐藤智久 (2004) : 駿河湾における反射法音波探査結果概要, 地質調査センター速報 No.65, 平成 25 年度沿岸の地質, 活断層調査研究報告, 1-11.
- 瀬野徹三 (2003) : 日本付近のプレートとその運動, SEISMO, 2, 9-11.
- 嶋村 清 (1986) : 駿河トラフ底の地形及び地質構造—衝突境界近傍の沈み込み帯についての地質的考察—, 地学雑誌, 95, 5, 1-22.
- 杉村 新 (1972) : 日本近海におけるプレート境界, 科学, 42, 192-202
- Suzuki F. (1987): Crustal Structure in the Tokai District, Central Japan as Derived from Explosion Seismic Observation and Their Tectonic Significances, Dr. Thesis, of Tokai University, Shimizu.
- 田治米鏡二 (1977) : 土木技術者のための弾性波による地盤調査法, 槇書店, pp234.
- 高橋成実, 野徹雄, 海宝由佳, 小平秀一, 金田義行 (2010) : 想定東海地震震源周辺域における沈み込み帯地殻構造, Blue Earth'10, 口頭発表, BE10-03.
- 高橋成実, 小平秀一, 佐藤 壮, 山下幹也, 海宝由佳, 三浦誠一, 野 徹雄, 瀧澤 薫, 野口直人, 下村典夫, 金田義行 (2015) : 伊豆・小笠原島弧の速度構造, 地学雑誌, 124 (5) , 813-825.
- 恒石幸正, 杉山雄一 (1978) : 駿河トラフを横断する駿豆断層, 地震予知連絡会会報, 20, 138-141.
- 鶴我佳代子, 関野善広, 神田穰太, 林 敏史, 萩田隆一, 會川鉄太郎, 保坂拓志, 菅原 博, 馬場久紀, 末広 潔, 青山千春, 鶴 哲郎, 中東和夫, 大西 聡, 稲盛隆穂, 井上則之, 大西正純, 黒田 徹, 飯塚敏夫, 村田徳生, 菅原大樹, 上田至高, 藤田和彦 (2017) : 東京海洋大学神鷹丸による駿河湾における海域 2 次元地震探査 (序報) , 地球惑星科学関連学会合同大会講演予稿集, SCG71-P14.
- Tsuruga, K., Y. Sekino, F. Hayashi, H. Baba, H. Sato, R. Hagita, T. Aikawa, H. Kondo, J. Kanda and Seismic survey team of Tokyo Univ. Marine Sci. Tech. (2018): Shallow subduction zone structures of Suruga Trough, central Japan, by means of 2-D seismic reflection and refraction surveys by Tokyo University of Marine Science and Technology., AGU Fall Meeting, T41G-0372.
- ト部 卓, 東田進也 (1992) : WIN-微小地震観測網波形検測支援のためのワークステーション・プログラム (強化版) , 地震学会講演予稿集秋期大会, 331
- 米倉伸之 (1984) : 駿河トラフ, 相模トラフ周辺の変動地形, 第 4 紀研究, 23 (2) , 83-90.
- 吉田明夫 (2001) : 東海地方におけるフィリピン海プレートの形状と東海地震, 月刊地球号外, 33, 104-113.