

三重県四日市市垂坂断層の反射法地震探査速報 Preliminary report on seismic reflection survey across the “Tarusaka Fault” (uncertain active fault), in Yokkaichi City, Mie Prefecture, central Japan

小松原 琢^{1*}・秋永康彦²・澤田基貴²・末廣匡基²・寺田龍矢³
KOMATSUBARA Taku^{1*}, AKINAGA Yasuhiko², SAWADA Motoki², SUEHIROMasaki² and
TERADA Tatsuya³

Abstract: The Tarusaka Fault is an estimated active fault in a densely populated urban area just north of the center of Yokkaichi City. A seismic reflection survey was conducted across this fault to clarify whether it is an actual active fault or not. The result shows that the fault scarp-like slope is not an active fault scarp but a terrace scarp, that this slope is located in a broad active tilting, and that this active tilting has developed since late Quaternary. However, it is still unresolved whether this active tilting is seismogenic or not. We hope to continue studying this subject by interpreting the drilling data.

Keywords: uncertain active fault, active fault in urban area, seismic reflection survey, Yokkaichi City, active tilting

要 旨

四日市市中心街北側に分布する垂坂断層が、活断層であるかどうかを明確にするため、推定断層を横切る測線で反射法地震探査を実施した。その結果、1) 断層崖とみられていた斜面は活断層崖ではなく、段丘崖であること、2) この斜面はブロードな活傾動帯の中に生じたものであること、3) 活傾動は第四紀後期以来活動しているものであること、が明らかになった。しかし、この活傾動が地震を引き起こすものか否かはいまだ解明できていない。この点について、ボーリングデータの解析により、さらに研究を進めたいと希望する。

1. はじめに

桑名断層と四日市断層は、四日市市中心市街地の北で右雁行配列する。鈴木ほか(1996a)は、両断層の接合部に北西-南東走向の「垂坂断層」を記載した(第1図)。岡田・東郷(2000)は、この見解を踏襲して、垂坂断層を長さ2.5 km、確実度 I、平均変位速度0.2 mm/年の確実な活断層として記載した。しかし、池田ほか(2002)、鈴木ほか(2010)、今泉ほか(2018)には「垂坂断層」は記載されていない。また、三重県が地震防災のために整備した活断層図(三重県, 2005b)にも「垂坂断層」は記載されていない。しかし、現状ではその存在を否定する根拠もまた示されていない。「垂坂断

層」は、四日市市中心市街地北側の人口密集地を通る推定断層である。仮にこの推定断層が活断層であるなら、大地震を発生させるリスクや地震規模などの評価、ならびにこの活断層の社会的な認知が必要である。

筆者らは、「垂坂断層」の存否を明らかにするために、四日市市西阿倉川町においてボーリングとP波反射法地震探査を実施した。

2. 探査測線

「垂坂断層」は、ほぼ全体が市街地に位置しており(第2図)、断層推定地点を横断する道路は交通量のわりに幅員の狭いものが多く、かつ多くの道路で埋設管が敷設されているため、反射法探査測線は、慎重に決めなければならなかった。

探査前には、厚さ最大1,900 mの堆積層(東海層群~沖積層)が高角の断層を中心として幅200 m程度(第2図に「垂坂断層」と記した撓曲崖状の傾斜地形の幅と同じ)の南西傾斜の引きずり構造を伴って変形している可能性があるとして想定していた。このため、断層想定位置よりも南側にやや長めに、長さ1 km以上の測線長をとることができ、推定断層に直交する北東-南西方向に伸びる測線候補を求めた。

実際の探査にあたって最初、片側1車線で歩道があるものの大口径の工業用水道が敷設されているA測線で探査を試みたが、良い記録が得られないと判断され

*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)

2 株式会社阪神コンサルタンツ (Hanshin Consultants Co., LTD.)

3 東京大学新領域創成科学研究科 (Graduate School of Frontier Sciences, the University of Tokyo)



第1図 「垂坂断層」とその周辺の活断層．活断層は鈴木ほか（1996a,b,2010）による．背景地図は地理院地図による．
 Fig. 1 Location map of the Tarusaka Fault and its surrounding active faults Active faults are after Suzuki *et al.*, (1996 a, b, 2010). Base map is after the “Chiriin-Chizu (GSI Maps)”

たため、その北西に隣接平行するB測線（最も狭い部分では幅員約2 mと狭く、断層推定位置を含む約550 m区間に径40 cmの上水道が敷設されている）で探査を実施した。B測線は、ボーリング調査地点（寺田ほか、2020）の約60 m南東を通る。またこの測線の南西端（CMP番号1：海蔵川左岸堤防）は、三重県が実施した地下構造調査（三重県、2004）の探査測線と接する。

3. 探査の概要

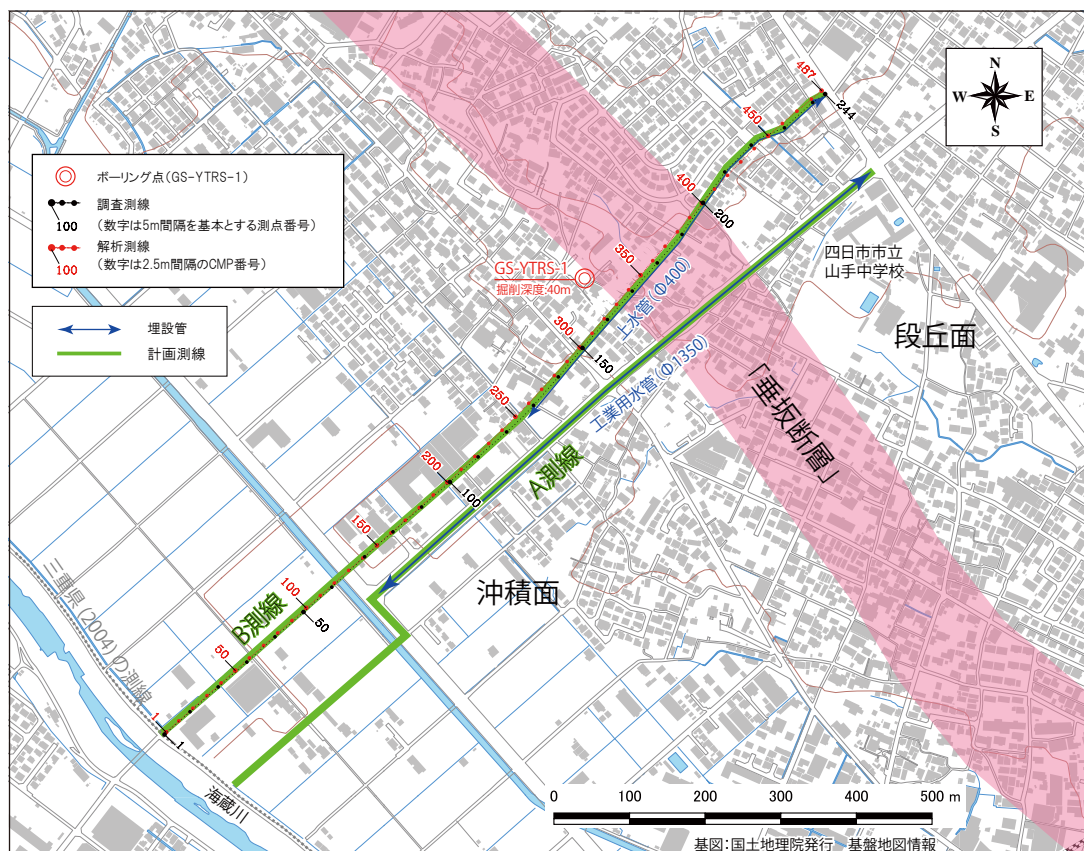
3.1 探査仕様

探査にあたっては、堆積層中～下部（深度数100 m～1,000 m程度）以浅の構造を明確に求めることを目的とし、住宅地内という測線の条件を考慮して、第1表に示す機材を用い、第2表に示す仕様でP波による探査を行った。データ取得測線（B測線）における探査は、

2020年1月8日から12日にかけて行った。なお探査仕様の詳細は、A測線で行った予察探査の結果に基づいて決定した。

3.2 データの質

測線北東部の約550 mの区間（CMP No. 250～487）には直径40 cmの上水管が埋設されており、かつ住家が密集しているため大出力の発震ができないという条件があり、この区間ではS/N比が低く、浅部の分解能は低い。測線南西部の約330 mの区間（CMP No. 1～125）では交通が多かったものの、周囲に住家が少なく大出力の発震が可能であったため、結果的には比較的良好なデータが得られた（第3図）。



第2図 探査測線位置図。

Fig. 2 Location of seismic survey line.

4. データ処理

一般に多用される共通中間点（CMP）重合法により S/N 比を高めた時間断面（第7図）を作成し、次いで重合速度構造（第6図）に基づきマイグレーション処理を施し時間断面中の反射面を正しい位置に戻した上で、さらに、深度変換によりマイグレーション処理後の時間断面（第8図）を深度断面（第9図、第10図）に変換した。データ処理及び解析は、株式会社阪神コンサルタントで開発したプログラムを用いて行った。データ解析長は2秒とした。また、速度構造が複雑な表層付近の影響を取り除くため表層静補正を行った。なお、表層静補正のために、受振距離約200mまでの初動走時について、表層を小さなセルに分割しトモグラフィ解析により個々のセルの弾性波速度を求め、表層の速度構造図（第4図）を作成し、同時に静補正量（第5図）を求めた。

第3表にデータ処理に用いたパラメータを示す。

5. 探査結果

第6図に重合速度構造を、第7図に重合後時間断面

を、第8図にマイグレーション処理後時間断面を、第9図に深度断面を示す。

6. 考察

6.1 地質構造

深度断面図（第9図）では、「垂坂断層」推定地点（CMP No.330～400付近）の周辺に急傾斜する反射面は認められず、測線のほぼ全体を通じて6°～15°南西に傾斜する反射面が認められる。浅部の速度構造と深度断面の図（第10図）からは、「垂坂断層」が想定される比高10mの傾斜地形を境に北東側（段丘上）で低速度層が厚く、南西側（沖積低地側）で低速度層が薄いことが読み取られる。

これらから、鈴木ほか(1996a)および岡田・東郷(2000)で「垂坂断層」と記載された傾斜地形は、構造性的なもの（断層崖・撓曲崖）ではなく、幅1kmないしそれ以上の南西傾斜帯の一部に形成された浸食性の崖（段丘崖）であると判断される。

深度断面に示された南西傾斜構造は、測線中央（CMP No. 260地点付近）において深度1,500m付近を通る反射面を境に下位では傾斜15°程度、上位では傾斜10°程

第1表 探査機材一覧.

Table 1 Field acquisition systems.

種類	形式	製品名	製造社	主な仕様
震源	中型バイブ レーター	EnviroVibe	IVI	実用周波数範囲：8 Hz～200 Hz
				最大ストローク：6.99 cm
				ホールドダウン重量：約7.5トン
				リアクションマス重量：約0.8トン
				ベースプレート設置面積：約1.1 m ²
				総重量：8.4トン
受振器	ジオフォン	OMNI-2400	Geospace	速度型地震計（1成分）
				固有周波数：15 Hz
				グルーピング：3個
探鉱機	独立型レ コーダー	GSR (GSX)	Geospace	A/D分解能：24ビット
				サンプリング間隔：
				0.25, 0.5, 1.0, 2.0, 4.0 msec
				保存データ形式：SEG-D, SEG-2
				周波数特性：3 kHz～1.6 kHz
				プリアンプゲイン：
0, 6, 12, 18, 24, 36 dB				

第2表 探査仕様一覧.

Table 2 Specifications of the acquisition system.

項目	内容	備考
探査手法	P波反射法地震探査	
測線名	GS-YTRS測線	第2図のB測線
測線長	上段：測定	A測線で行った予察探査結果を基に決定 (他の仕様も同様)
	下段：解析	
探査目標深度	500 m以上	東海層群中部ないし下部以上の層準
標準発震点間隔	5 m	交差点は発震をカット，隣接家屋等の状況に応じ調整
標準受振点間隔	5 m	障害物がある場合は受振器設置位置をずらして設置
標準収録チャンネル数	240（固定展開）	
収録記録長	2 秒	
サンプリング間隔	1 msec	
収録様式	SEG-D	
標準垂直重合数	標準10回	状況に応じ発震回数を5回に変更
標準スイープ長	16 秒	
スイープ周波数	10 Hz～100 Hz	

度の傾斜不整合面が認められるが、この面より上位に関していえば、若干上部ほど傾斜が緩くなる傾向が認められるものの、明瞭な傾斜不整合は認められず、測線中央において深度約 100 m の反射面の傾斜と深度約 500 m の反射面の傾斜はともに 6° 程度であり、両者間に違いは認めがたい。ただし、浅部に関して言えば、第 10 図の CMP No.100 の標高 -40 m 付近において緩い（不明瞭な）傾斜不整合を認めることができる。

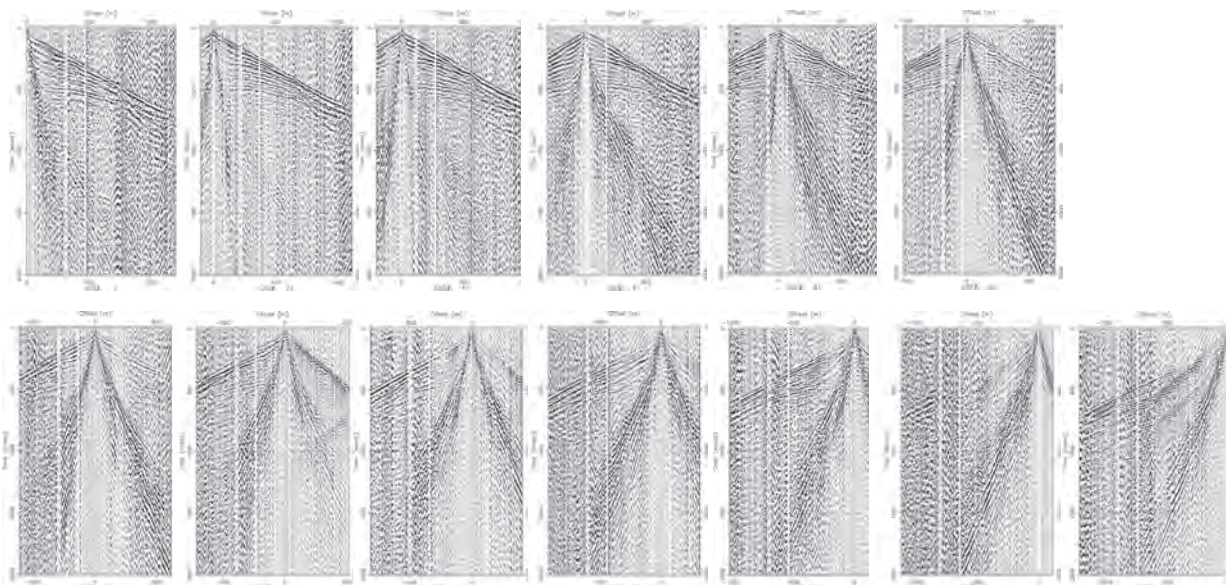
6.2 地層と反射面の対比

調査地点周辺では、三重県（2004, 2005a）の反射法地震探査や微動アレー調査による地下構造調査や、吉田（1984）、吉田ほか（1991）の地質調査が行われており、

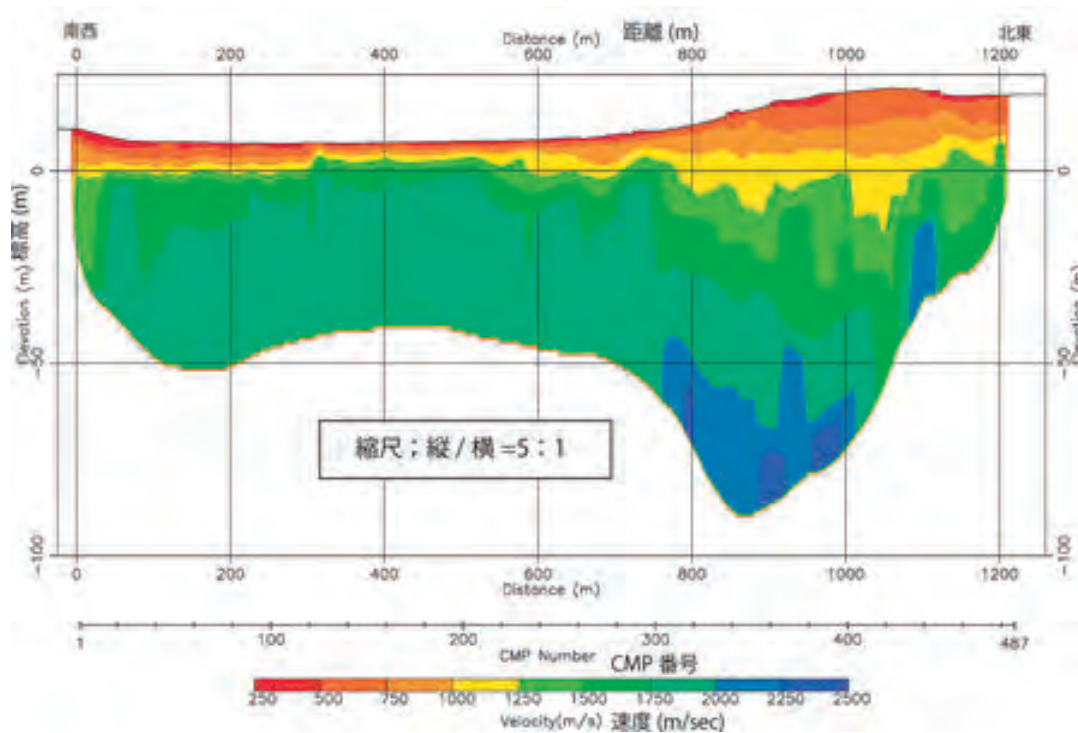
それらと本調査測線で得られた速度層を対比する。

既存のボーリング情報としては、測線南端から約 3.5 km 南の四日市市街地に位置する四日市温泉（第 1 図）の深度 800 m まで掘削したボーリング情報が公表されている。吉田（1984）によれば、このボーリングの深度 468 m 以浅の砂礫を挟む上部は東海層群中部の泊累層（最上部鮮新統～最下部更新統）、砂泥互層からなる下部は同下部の八王子（あるいは亀山）累層（上部鮮新統）に対比可能であるとされている。

また、測線北端の約 1 km 北西の垂坂山周辺では、砂泥互層を主とする東海層群中部・大泉累層（泊累層に対比される）を傾斜不整合に覆って泥礫互層からなる見当山累層（中部更新統）が分布する（吉田，1984）。



第3図 発震記録の例.
Fig. 3 Examples of shot gathers.



第4図 表層の速度構造.
Fig. 4 Tomographic surface velocity model.

しかし、測線近傍の YTRS-1 ボーリングでは深度 37 m ~ 40 m に半固結泥岩が認められている、これは露頭で認められる見当山累層と比較して固結程度が高く、東海層群に相当する可能性が高い。

現段階では、今回の探査で得られた反射面と丘陵に露出する地層を確実に対比することは困難であるが、以上の知見から、先述した CMP No.100 において標高

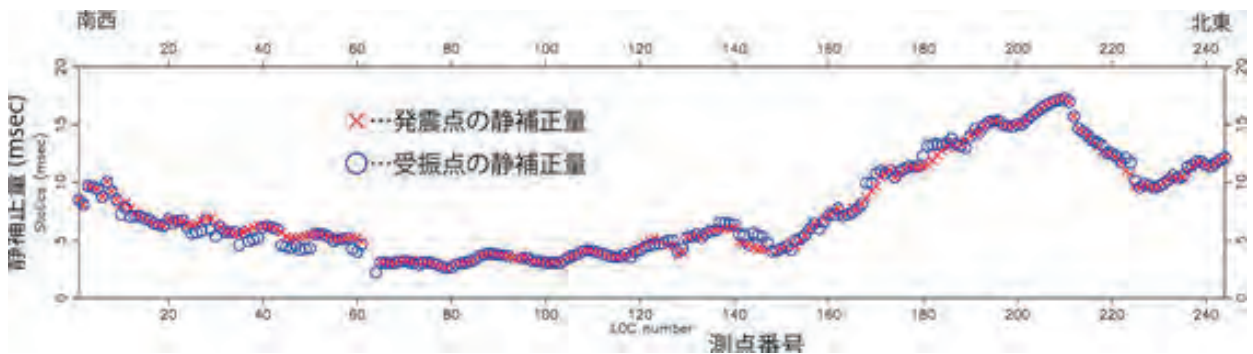
-40 m 付近から深度 1,500 m 付近に至る層準は東海層群に対比される可能性が高い。

7. 調査結果のまとめと今後の課題

本調査によって、一時「垂坂断層」と認定されていた傾斜地形は活断層ではなく、幅広い南西傾斜構造の

第3表 データ処理に用いたパラメータ.
Table 3 Examples of shot gathers.

処理名	パラメータ	設定値	備考
		GS-YTRS測線	
プレフィルタ	バンドパス	20 Hz~120 Hz	
	フィルタ帯域		
位相補正	—	インパルスに変換するオペレータを設計し適用	
振幅回復	ゲインカーブ	25 msec	
	算出用時間		
	ウィンドウ幅		
デコンボリユー ション	自己相関演算用ゲート長	1,500 msec	タイムバリエーション
	フィルタ長	150 msec	スペクトラル
	ホワイトノイズ	1%	ホワイトニング ⁶ 等
静補正	メッシュサイズ	1 m×1 m	
	初期速度モデル	深度と共に単調増加 (100 m/s~1,200 m/s)	
	最大オフセット距離	200 m	
	再構成速度範囲	100 m/s~3,500 m/s	
	トモグラフィ繰り返し回数	80回	
	置換速度	1,500 m/s	
	標高補正用速度	1,500 m/s	
速度フィルタ	種類	<tau-p フィルタ>	
		チューブウェーブノイズを抑制するため、 1,200 m/s以下の速度を除去するように適用	
残差静補正	最大許容時間/shot量 (1回当)	適用せず	補正量を自動算出
	繰り返し算出回数	適用せず	
NMO補正	ストレッチミュート適用比率	1.75	
帯域通過フィルタ	タイムバリエーションフィルタ	0 msec~200 msec ; 20 Hz~250 Hz	マイグレーション 処理後の時間断面 に適用
		200 msec~1,100 msec ; 10 Hz~120 Hz	
		1,100 msec~ ; 5 Hz~90 Hz	



第5図 静補正量分布.
Fig. 5 Static correction profile.

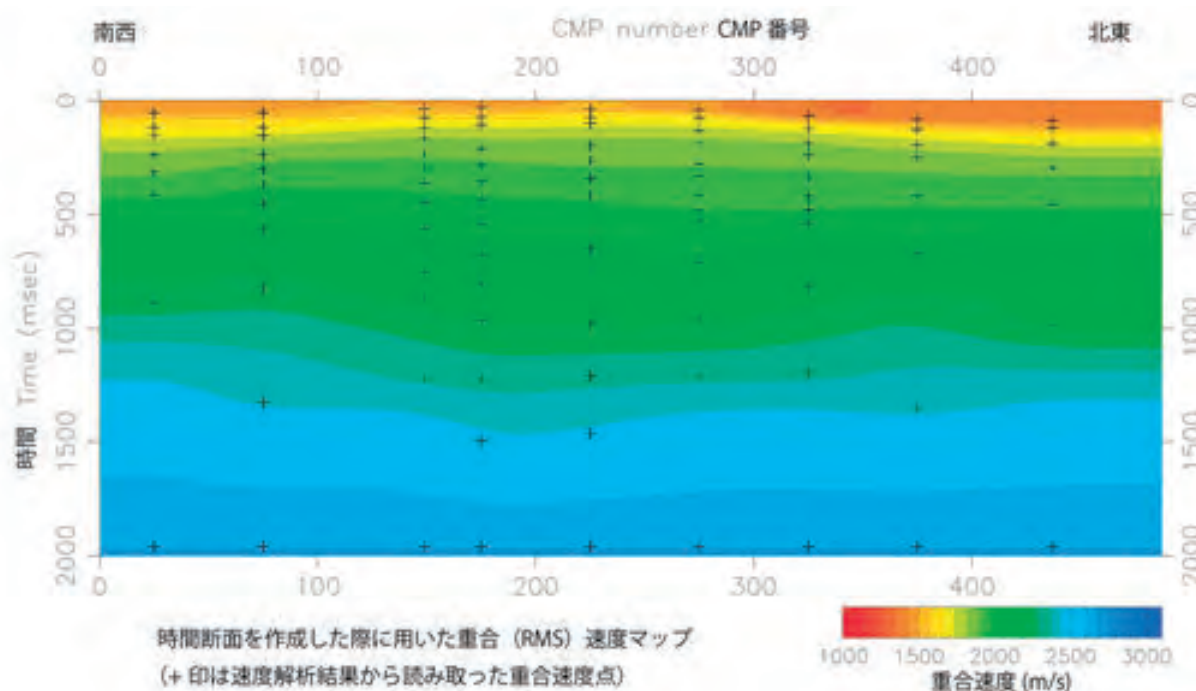
中の段丘崖であることが明らかになった。

しかし、「幅広い南西傾斜構造」は、東海層群上部以上の地層を一様に傾動させていることから、ごく最近の地質時代（おそらく第四紀後半）になって活動を開始した活傾動運動によるものであることも確かといえる。

この「幅広い傾動運動」が、どのような運動様式に

よるものか（特に地震性地殻変動によるものか、非地震性変動によるものか）を明らかにすることは、今後に残された重要な課題である。

また、この反射法地震探査では、測線北東部を中心として浅部の解像度は高くない。このため、既往ボーリング資料の検討などの調査を通じて、浅部の地質構造その年代を解明することは、「幅広い傾動運動」の活



第6図 重合速度構造図．時間断面を作成した際に用いた重合 (RMS) 速度マップ．
Fig. 6 RMS velocity model for processing time seismic section.

動性を評価する上でも大変重要な課題である．

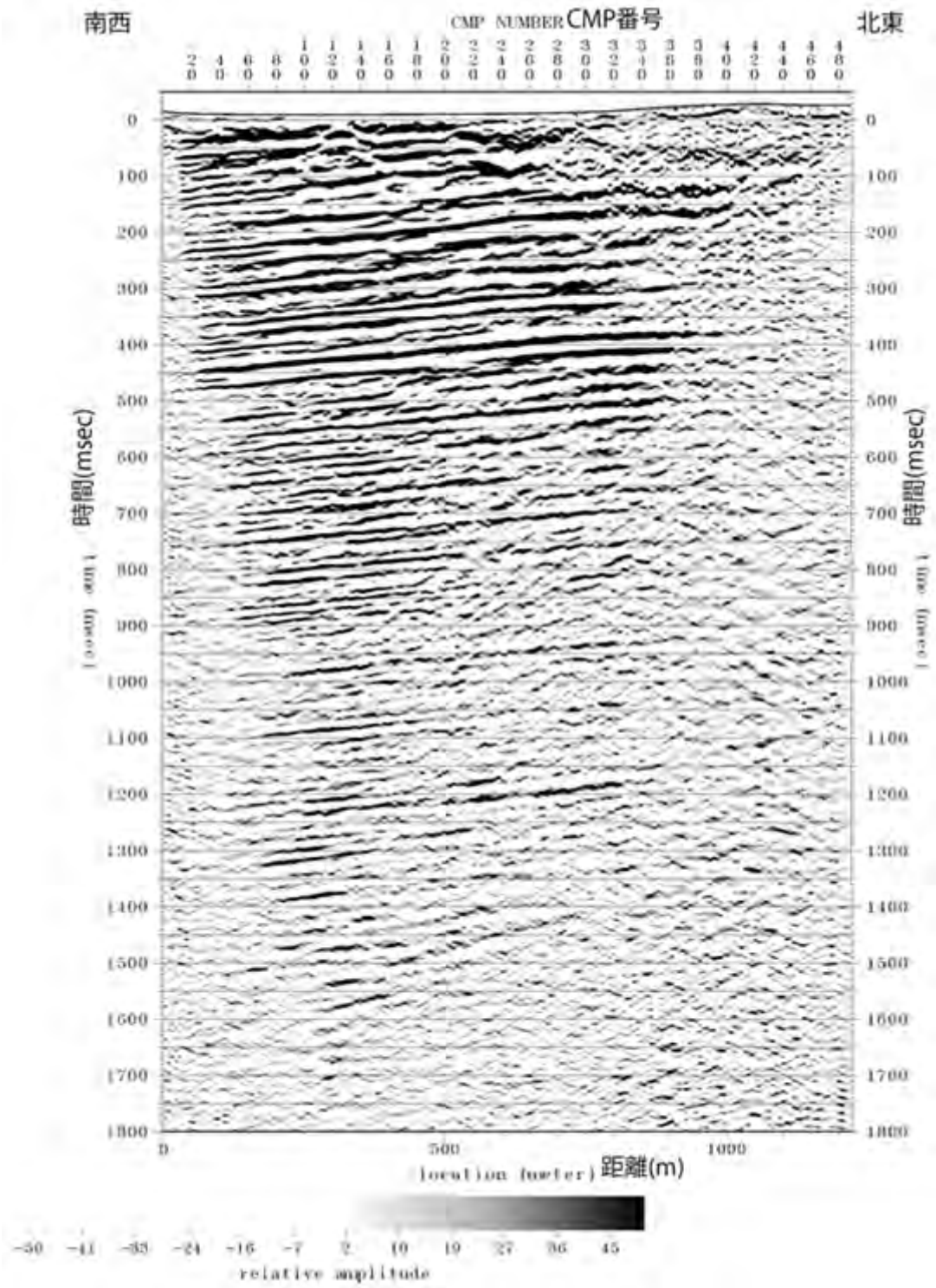
以上の課題解決を通じて、さらに当地域の地震危険性評価の精度を向上させていきたい．

謝辞：本調査にあたり、海蔵地区連合自治会の水谷重信会長、西阿倉川連合自治会の羽場誓司会長、松が丘地区自治会の小津誠会長には関係地域住民の皆様のご理解・ご協力をいただくために大きなご助力をいただいた。西阿倉川地区および松が丘地区の皆様には、調査にご理解・ご協力をいただいた。四日市市危機管理室の田中宏和主幹と中山宗行様・同海蔵地区市民センター田中良和館長と上杉達也副館長・同農水振興課の山中詩織様・同道路管理課の小林孝行主幹・川村茂樹様、三重県四日市建設事務所の井坂将太主事・下村沙耶主事各位からは、地元交渉や道路使用にあたって大きなご協力を賜った。四日市北警察署よりは道路使用許可などの法令許可をいただいた。以上の地元各位のご協力に心より感謝申し上げます。

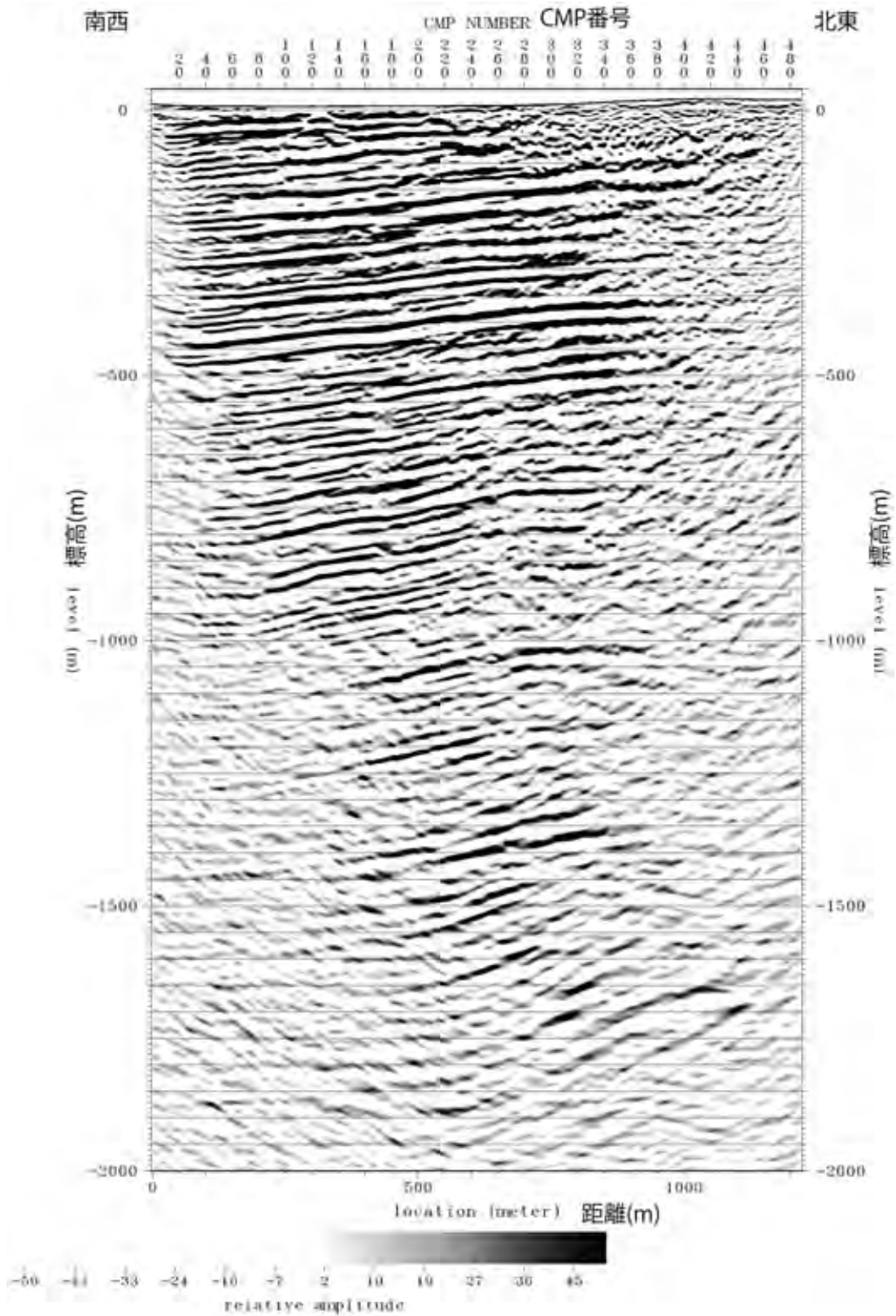
文 献

池田安隆・今泉俊文・東郷正美・平川一臣・宮内崇裕・佐藤比呂志 (2002) 第四紀逆断層アトラス．東京大学出版会，254p.
今泉俊文・宮内崇裕・堤 浩之・中田 高 (2018) 活断層詳細デジタルマップ [新編]．東京大学出版会，フラッシュメモリ + 説明書，141p.

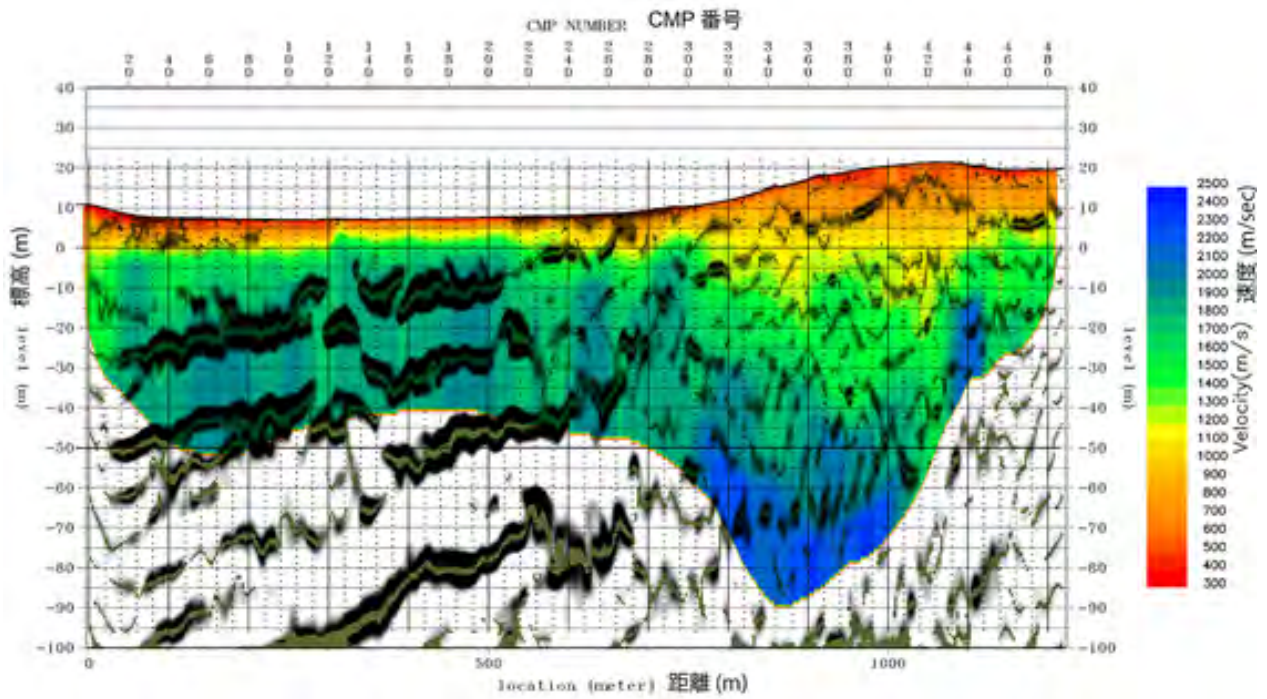
三重県 (2004) 平成 15 年度 伊勢平野に関する地下構造調査成果報告書．【<https://www.hp1039.jishin.go.jp/kozo/Mie8frm.htm>】 (2020 年 4 月 22 日閲覧)
三重県 (2005a) 平成 16 年度 伊勢平野に関する地下構造調査成果報告書．【<https://www.hp1039.jishin.go.jp/kozo/Mie8frm.htm>】 (2020 年 4 月 22 日閲覧)
三重県 (2005b) 三重県内活断層図 (北勢地域)．防災みえ.jp. 【www.bosaimie.jp/static/X_MIE_mhc00】 (2020 年 4 月 23 日閲覧)
岡田篤正・東郷正美 (2000) 近畿の逆断層．東京大学出版会年，395p.
鈴木康弘・千田 昇・渡辺満久 (1996a) 1:25,000 都市圏活断層図「四日市」．国土地理院．
鈴木康弘・千田 昇・渡辺満久・岡田篤正 (1996b) 1:25,000 都市圏活断層図「桑名」．国土地理院．
鈴木康弘・千田 昇・渡辺満久・岡田篤正・中田 高・熊原康博・後藤秀昭・杉戸信彦・廣内大助・八木浩司・池田安隆 (2010) 都市圏活断層図 伊勢平野の活断層「四日市 (第 2 版)」．国土地理院．
吉田史郎 (1984) 四日市地域の地質．地域地質研究報 (5 万分の 1 図幅)，地質調査所，81p.
吉田史郎・栗本史雄・宮村 学 (1991) 桑名地域の地質．地域地質研究報告 (5 万分の 1 図幅)，地質調査所，154 p.



第7図 重合後時間断面図.
Fig. 7 Time stacked seismic section.



第9図 深度断面図．縦横比は1：1。
 Fig. 9 Depth converted seismic section.No vertical exaggeration.



第 10 図 浅部の深度断面図にトモグラフィー解析から得られた速度構造を重ねた図．縦横比は 1 : 1.
Fig. 10 Depth converted seismic section of surface layer overlaid with tomographic velocity model.
No vertical exaggeration.