

3. 2 断層活動履歴や平均変位速度の解明のための調査観測

a. 浅海域での国府津－松田断層の活動様式の解明

(1) 業務の内容

(a) 業務題目　浅海域での国府津－松田断層の活動様式の解明

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名
独立行政法人　産業技術総合研究所	研究員	丸山　正
独立行政法人　産業技術総合研究所	センター長	岡村　行信

(c) 業務の目的

国府津－松田断層の海域延長部で、高分解能音波探査およびコアリングを行う。これらの調査結果に基づき、地震活動履歴に関するデータが十分に得られていない同断層の完新世の活動状況を解明する。さらに、本研究の成果と他のサブテーマの成果を統合することにより、地震発生の確率評価と強震動予測のための地震シナリオの高度化を目指す。

(d) 3 カ年の年次実施計画

1) 平成 21 年度：

相模湾沿岸部でこれまでに実施された海底地形、音波探査、採泥などの調査資料を収集・検討し、来年度以降の調査準備を進める。

2) 平成 22 年度：

小田原から大磯にかけての沿岸海域においてブーマーマルチチャンネル音波探査を実施し、国府津－松田断層の分布および活動性を把握するとともに、活動履歴解明に適した堆積物の有無を検討する。

3) 平成 23 年度：

浅海域での国府津－松田断層の活動履歴を解明するため、コアリング調査を実施する。

(e) 平成 22 年度業務目的

小田原から大磯丘陵にかけての沿岸海域においてブーマーマルチチャンネル音波探査を実施し、国府津－松田断層の分布および活動性、活動履歴解明に適した堆積物の有無を検討する。

(2) 平成 22 年度の成果

(a) 業務の要約

浅海域での国府津－松田断層および周辺の活構造の分布と活動様式を把握する

ため、小田原市早川から中郡大磯までの相模湾北西部に設けた 17 測線（延べ測線長約 108 km）でブーマーを音源とする高分解能マルチチャンネル音波探査を実施した。その結果、相模湾北西沿岸および大磯海脚では、海面から往復走時で最大約 0.4 秒までの深度における地質構造をイメージングすることができた。反射断面の解釈により、陸域で認定されている国府津－松田断層の走向延長部の沿岸部で同断層の存在を示唆する反射面の不連続が認められた。また、同断層上盤側（東側）に分布する二宮海底谷および大磯海脚北西部では、北東-南西方向に軸をもつ褶曲群が認められ、その一部には最終氷期に形成されたとみられる海脚頂部の海食台に背斜状の変形を示唆する反射パターンが認められた。ただし、推定された活構造沿いには上部更新統-完新統はほとんど分布しておらず、地層採取による後期更新世以降の活動性の定量的な評価は困難である。

(b) 業務の成果

1) データの取得

本調査では、国府津－松田断層の南方延長部および同断層周辺に分布する活構造の分布や活動様式を把握することを目的として、相模湾北西沿岸部においてブーマーを音源としたショートマルチチャンネル反射法音波探査を実施した（図 1, 図 2）。ショートマルチチャンネル音波探査は、探査機材が小型のため 5 トン程度の漁船に搭載することができ（村上ほか, 2004; 村上, 2007）（図 3）、従来近づくことができなかつた相模湾の海岸線付近での高分解能の反射データの取得を可能にした。浅海域におけるショートマルチチャンネル音波探査を用いた活構造調査の有効性は、能登半島地震震源域での調査で報告され（井上ほか, 2007）、その後沿岸海域での活断層調査に広く使用されるようになっている（例えば、岡村, 2010; 杉山ほか, 2010）。表 1 に今回の探査仕様を示す。

本調査対象海域は、西端を小田原市早川、東端を中郡大磯町、南端を大磯海脚とする相模湾北西部である（図 1）。測線の設定に際しては、国府津－松田断層の延長部およびその西方に並走して分布する可能性が指摘されている断層（例えば、活断層研究会編, 1991; 楠ほか, 1992; 渡辺, 1993; 中田・今泉編, 2002）に加えて、国府津－松田断層東方の二宮海底谷沿いに推定されている断層（例えば、関東第四紀研究会, 1987; 伊藤ほか, 1988; 森ほか, 2010）や大磯海脚に発達する褶曲（大河内, 1990）など、相模湾北西部でこれまでに推定されている断層や褶曲をカバーするようにした。測線の方向は、図 1 に示すように、これまでに報告されている断層や褶曲の走向と直交するように展開し、さらに各測線の反射断面に認められる反射面の対比・追跡のため、これらと直交するものを設けた。調査測線は合計 17 本、延べ測線長は約 108 km である。

ショートマルチチャンネル音波探査は、音源としてブーマー（公称エネルギー約 300 J の電磁誘導型音源）を 1.25 m 間隔で発振し、チャンネル間隔 2.5 m、12 チャンネルのストリーマーケーブル（ミニストリーマー）で受信した（図 2, 図 3）。データ収録時間は次の発振までとし、SEG-Y フォーマットへの変換時に 0.6

秒でカットした。サンプリング周波数は 10,000 Hz とした。船位測量はディファレンシャル GPS により行い、水深測量には音響測深器を用いた。これらの各調査データのデジタル収録と合わせて、調査船に最も近い第 1 チャンネル（船尾後方約 25 m、ブーマー音源の後方約 10 m）の往復走時 0.2 秒間のデータをモニター記録としてアナログ出力し、現場で地質状況を把握した。これらの現場作業は 2010 年 10 月 19 日～10 月 24 日に実施した。

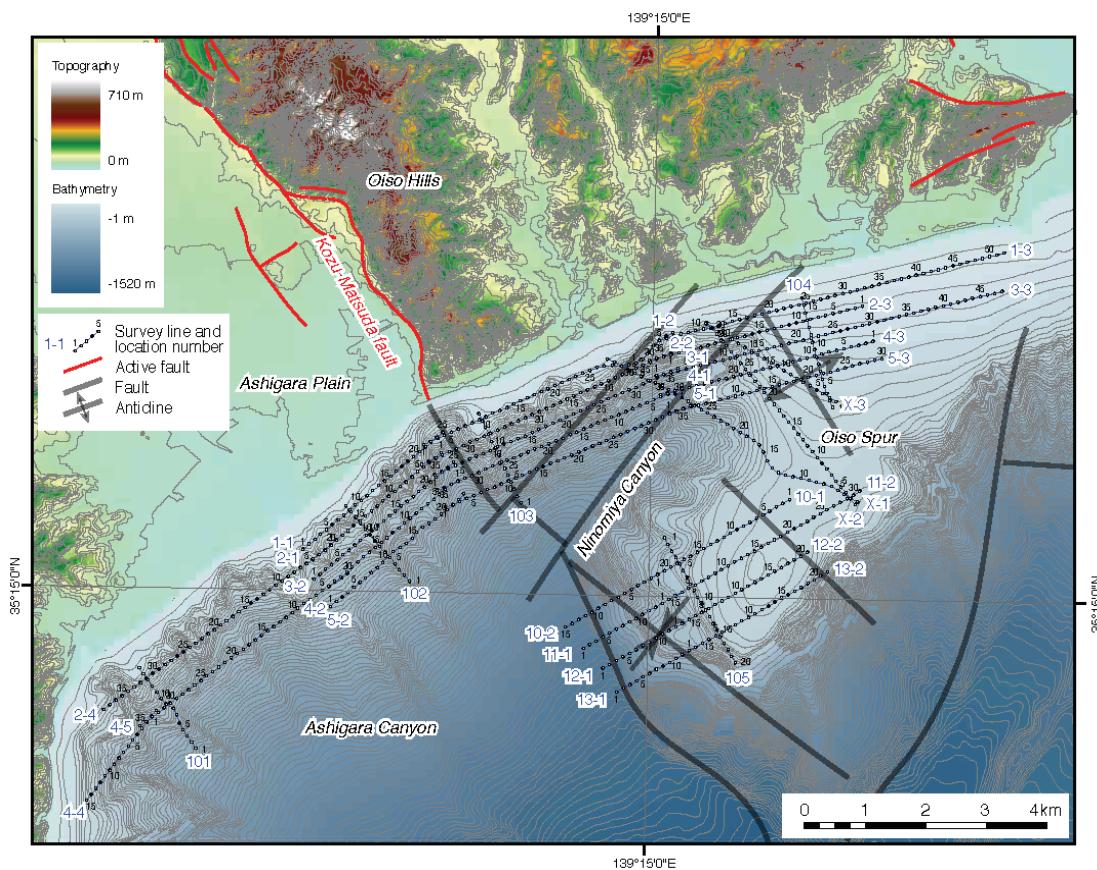


図 1 相模湾北西部およびその周辺地域の地形と断層の分布と本研究の調査測線。陸域の活断層の分布は、中田・今泉編 (2002)、海域の地質構造は、森ほか (2010) による。地形データは、国土地理院基盤地図情報数値標高モデル 10 m 標高 (<http://fgd.gsi.go.jp/download/GsiDLSelItemServlet>) および海上保安庁 (1992) を使用。

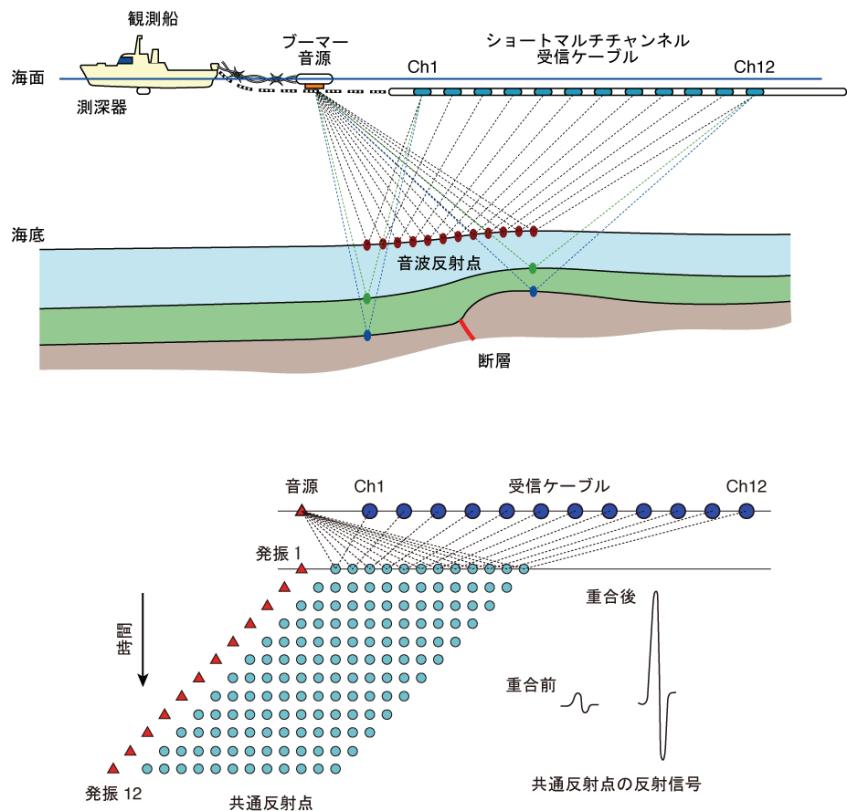


図2 (上) ショートマルチ音波探査システムおよび(下) 反射信号の重合の模式図 (村上, 2007)。



図3 探査装置。(a) 探査船(小田原市漁協所属正春丸, 4.8トン), (b) 発振装置(英国 Applied Acoustic 社製ブーマーシステム)、(c) 受信装置(12チャンネルストリーマーケーブル), (d) 発振装置曳航風景(背後は大磯丘陵)。

表 1 探査の仕様

	調査方式	ブーマー方式
	送波器（音源）	ブーマー
発振器		電磁誘導振動素子 1 個
		送信電圧 : 3.55 kV
	発振エネルギー	約 300 J
	送波器の深度	0.3 m
	発振間隔	約 1.25 m または 2.5 m (水深 200 m 以深)
受信部	受信機の型および素子数	圧電型振動素子 5 素子/ch
	チャンネル数	12 ch
	チャンネル間隔	2.5 m
	受波器の深度	0.5 m
デジタル記録	収録時間	1.25 m 発振 : 0.6 秒または 0.8 秒 2.5 m 発振 : 1.2 秒
	A/D 変換 (量子化)	16 bit
	サンプリング周波数	10,000 Hz
モニター記録	受信周波数	500~2,000 Hz
	記録掃引時間	0.4 秒
	記録深度範囲	300 m
	記録方式	感熱
	記録密度	100 line/inch
	有効記録幅	254 mm (10 inch)
	測点間隔	125 m (約 100 または 50 ショット毎)
	船速	3 ~ 4 ノット

2) データ処理

収録した音波探査データは、米国 Parallel Geoscience Corporation 社製のマルチチャンネルサイスマックデータ処理ソフトウェア Seismic Processing Workshop (SPW) を用いて波形処理、速度解析などを行い、重合断面を作成した。これにより得られた反射断面は、条件がよければ海面から往復走時で約 0.4 秒付近までの地質構造がイメージングできた。また、SPW を用いた重合断面で活構造の可能性を示す構造が認められた測線を中心に、株式会社地球科学総合研究所に依頼し、図 4 に示すようにストリーマーケーブル深度補正、波浪補正、重合速度解析などについてより高度なデータ処理を行い、より重合度が高い断面を得た。

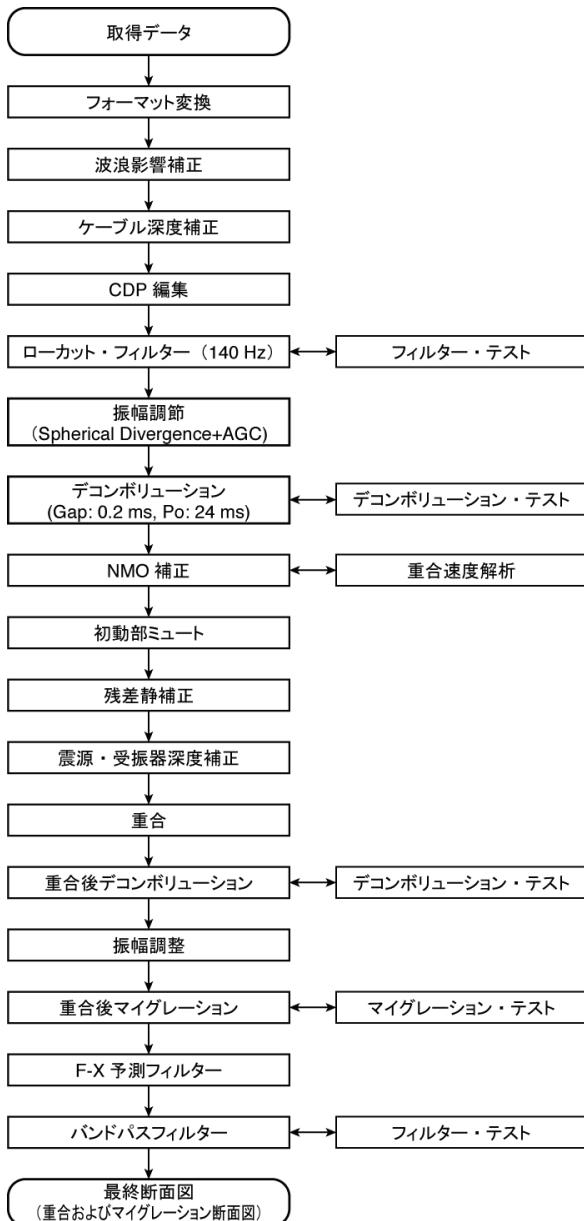


図4 マルチチャンネルサイスミックデータ処理フロー図。

3) 海底地質構造

調査海域には陸棚が殆ど分布せず、水深が沖（南）に向かって急激に大きくなっている（図1）。また、足柄平野南端から海底谷に向かう南に開いた急傾斜の斜面には、ガリーが多数生じており、ガリー間には堆積物の再移動・再堆積によるとみられる比高数10mの高まりが発達している（図1）。こうした海底地形をもつ本調査海域では、本調査で使用した音源のエネルギーから、往復走時約0.4秒（水深約300m）以深の反射記録は得られなかった。また、谷地形と高まり地形が繰り返す海底谷部では、発振した音波が複雑に散乱・回折し、明瞭な反射記録が得られなかった。結果的に、本調査で明瞭な反射記録が取得できた部分は、陸棚部や海脚部といった水深が約150m以浅の平坦地に限定された。そのため、本調査

で実施した測線のうち、明瞭な反射記録が得られていない区間に断層や褶曲などの地質構造が存在する可能性は否定できない。

本調査で取得した反射断面の解釈に基づき認定した地質構造を図5に示す。また、地質構造が明瞭にイメージングできた測線の重合断面と解釈断面の一部を図6～図13に示す。各断面図の縦軸には往復走時と深度を併記した。深度は、水中および堆積物中の音速を1,500 m/秒と仮定して求めた。地質構造の連続性は、隣接する測線での地質構造の類似性に基づいて推定した。以下、海岸から南に向かって、イメージングされた地質構造について報告する。

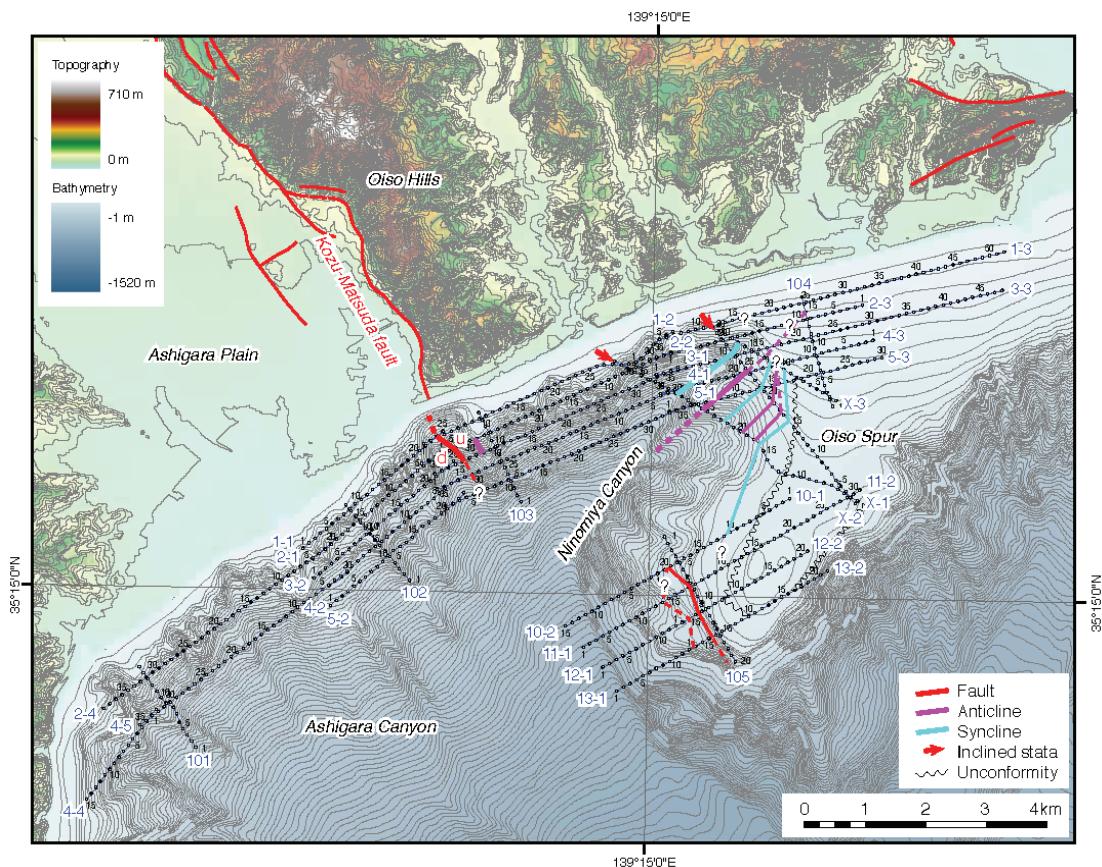


図5 地質構造図。

海岸線に平行する測線1～測線5は、陸上で足柄平野東縁に認定されている国府津－松田断層の走向延長部を横切る(図1)。そのうち、最も陸側に位置する測線1では、足柄平野の海域延長にあたる足柄海底谷の東端の測位点(Event No.)1-1-24付近を境に、その西側の地層は緩やかに東傾斜し、東側の地層は西側に急傾斜することから、東傾斜の逆断層が存在すると解釈した(図6)。反射断面から推定された東傾斜の断層面は、陸上の国府津－松田断層の傾斜と調和的である。ただし、反射記録からは、推定された断層の上端は不明である。

測線1で認定された断層の南への連続は、水深が増す南側の測線に向かって不明瞭になるものの、少なくとも測線2および測線3では測線1と同様の反射パタ

ーンが認められる（図5、図7、図8）。

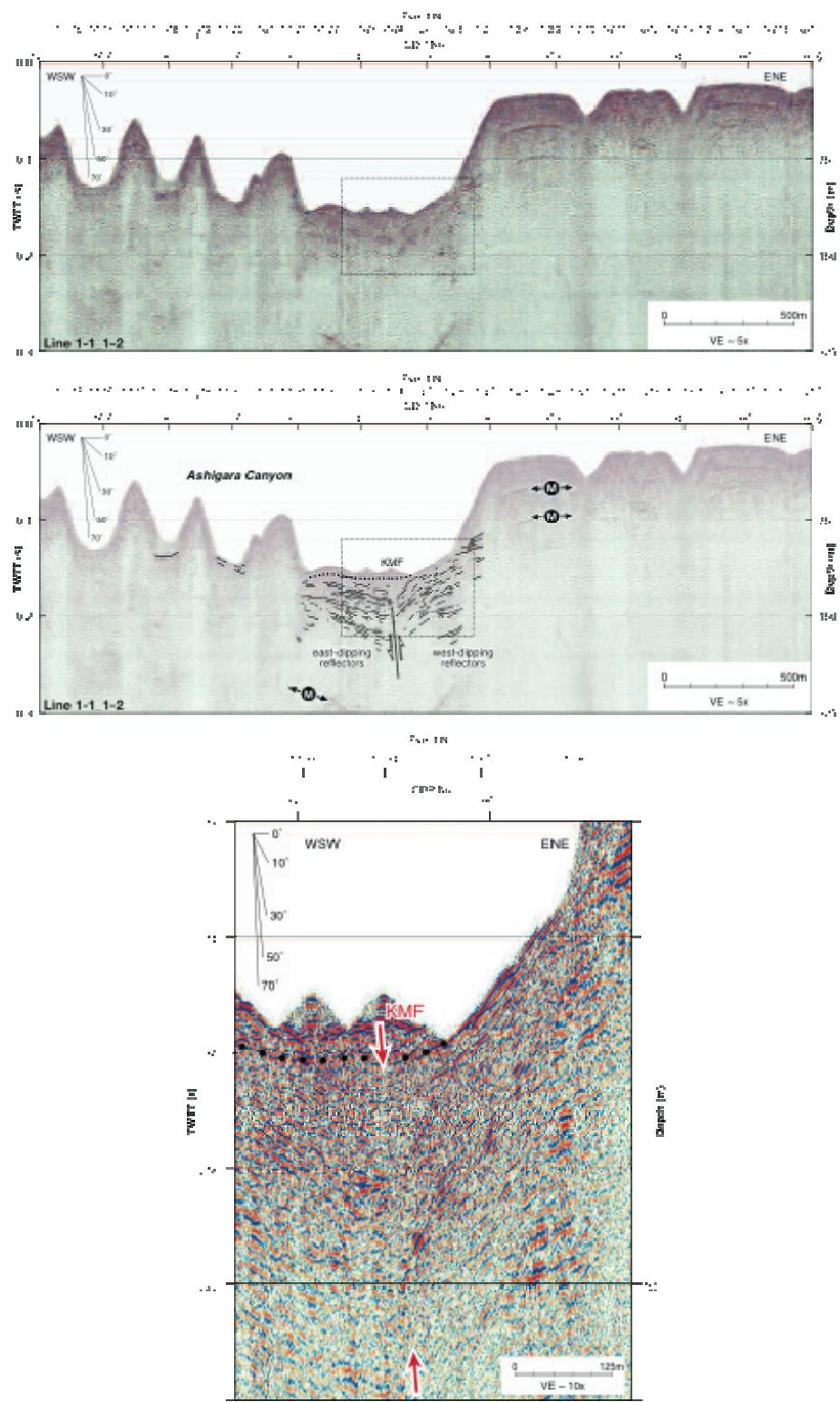


図6 測線1の重合断面および解釈断面。

(上) 重合断面、(中) 解釈断面 (Mは海底からの多重反射、KMF：国府津－松田断層)、(下) 断層周辺部分の拡大図(図の範囲を図6上、図6中に黒破線で示す)。

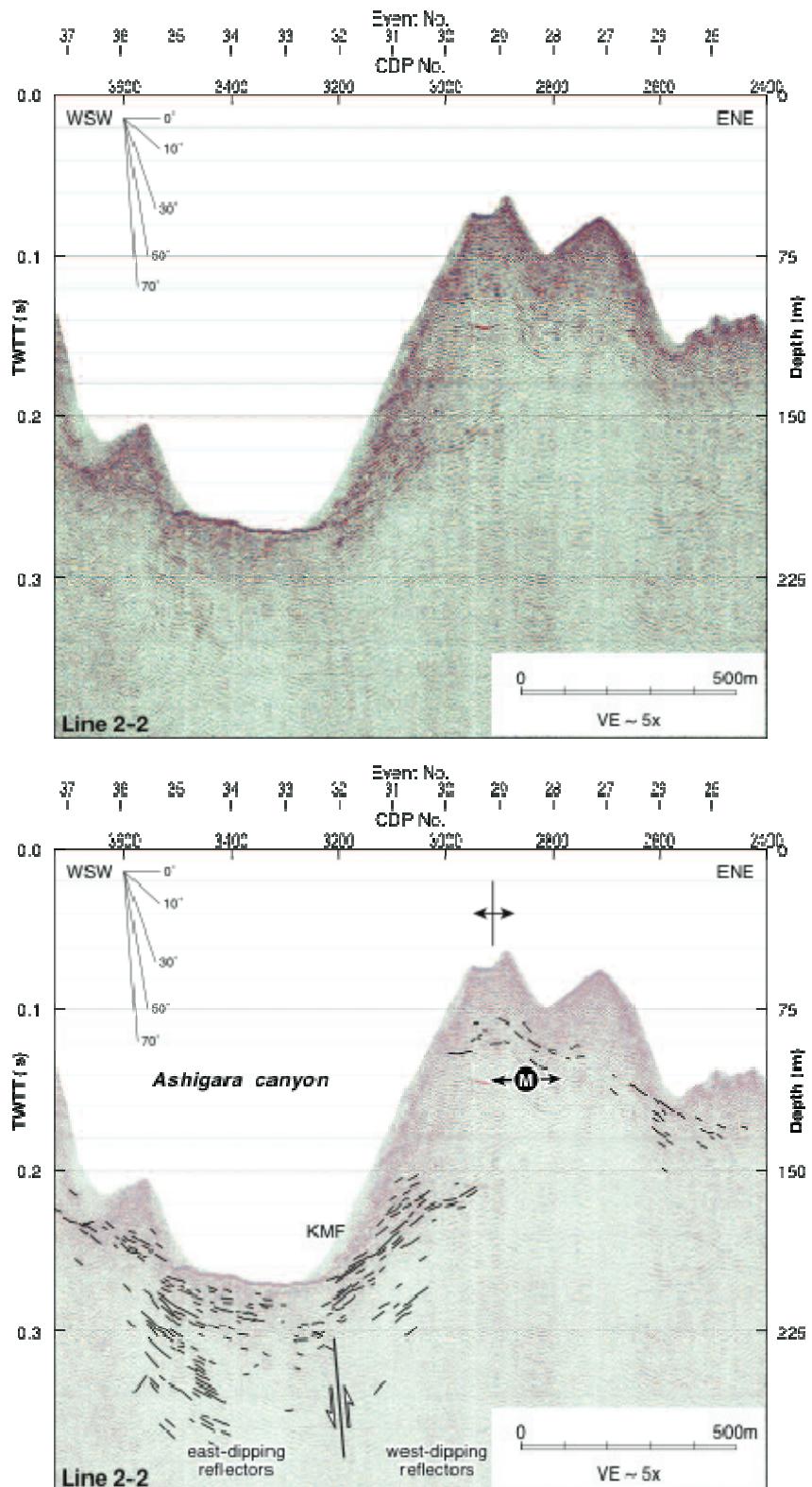


図 7 測線 2-2 の重合断面および解釈断面。
(上) 重合断面、(下) 解釈断面。

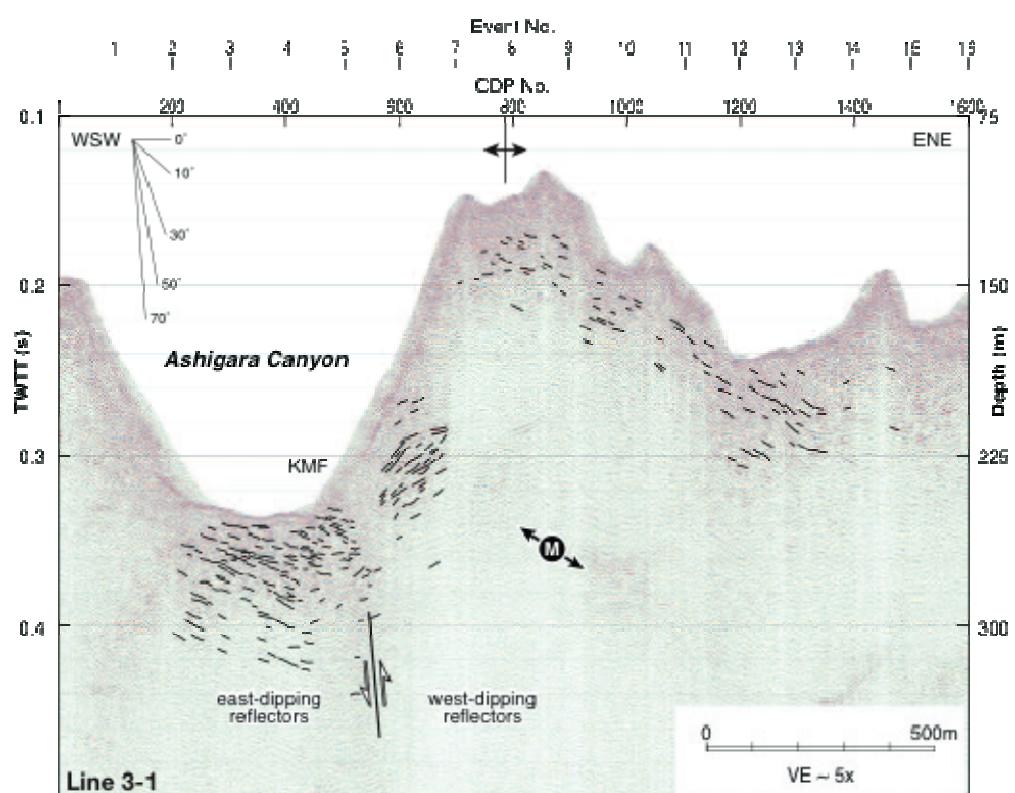
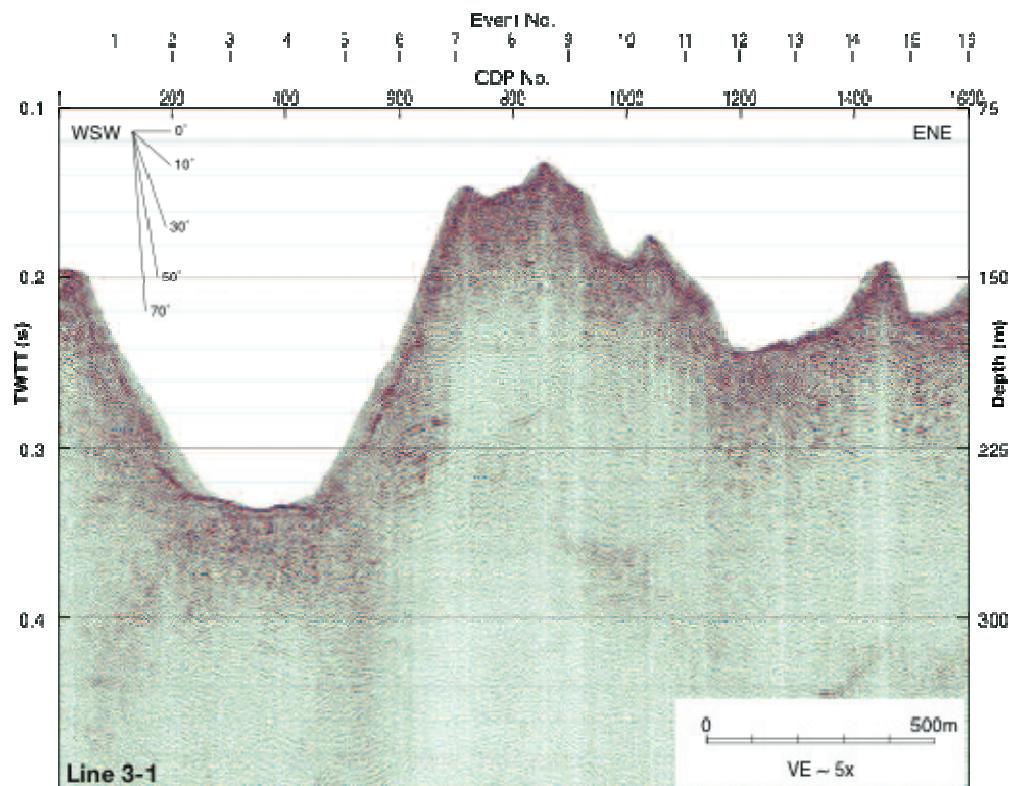


図 8 測線 3-1 の重合断面および解釈断面。
(上) 重合断面、(下) 解釈断面。

測線 1 ～測線 5 で推定された国府津 - 松田断層をさらに南方沖に追跡すると、大磯海脚西側斜面基部にほぼ一致するようにみえる（図 1、図 5）。こうした地形配置などから、国府津 - 松田断層は、大磯海脚西側斜面基部付近に連続すると指摘されていた（例えば、大河内, 1990；楠ほか, 1992；渡辺, 1993）。この海脚西側斜面基部付近に推定されている国府津 - 松田断層を確認するため、測線 10 ～測線 13 の 4 測線を設けて探査を試みた。しかし、海脚西斜面の基部の水深が 600 m 以深と深く、今回の探査仕様では海底下の地質構造をイメージできる反射記録が得られなかつた。

ところで、海底地形図には、大磯海脚西斜面中腹に西側低下の崖が北北西 - 南南東方向に延びている。反射断面には、その崖に一致する地点で、高角傾斜で西側が低下するセンスをもつ断層が 2 条認定された（図 9, 図 10）。これらの断層の傾斜方向は不明であるが、分布位置や東に凸の円弧状の平面形状から判断すると、斜面基部に推定されている東傾斜の逆断層の上盤側に発達する副次的な正断層の可能性がある。

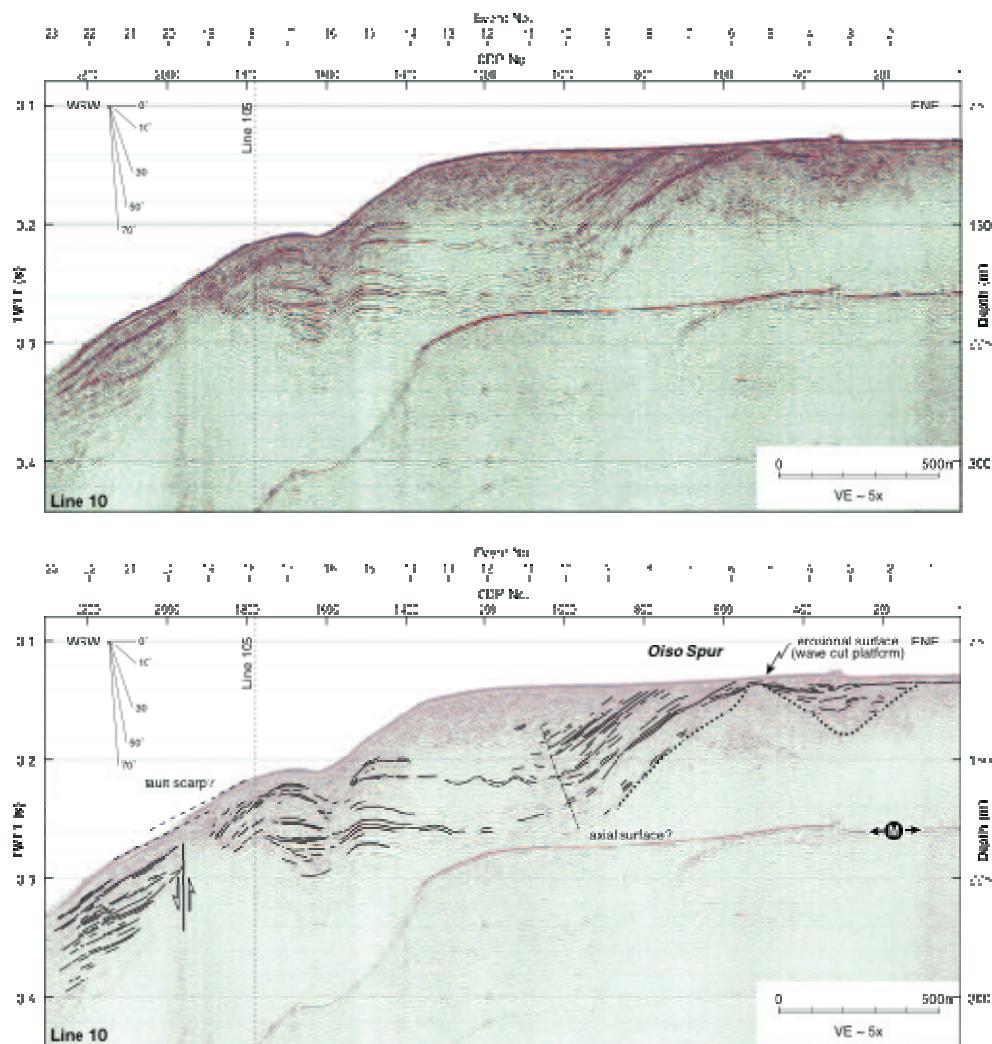


図 9 測線 10-1 の重合断面および解釈断面。
 (上) 重合断面、(下) 解釈断面。

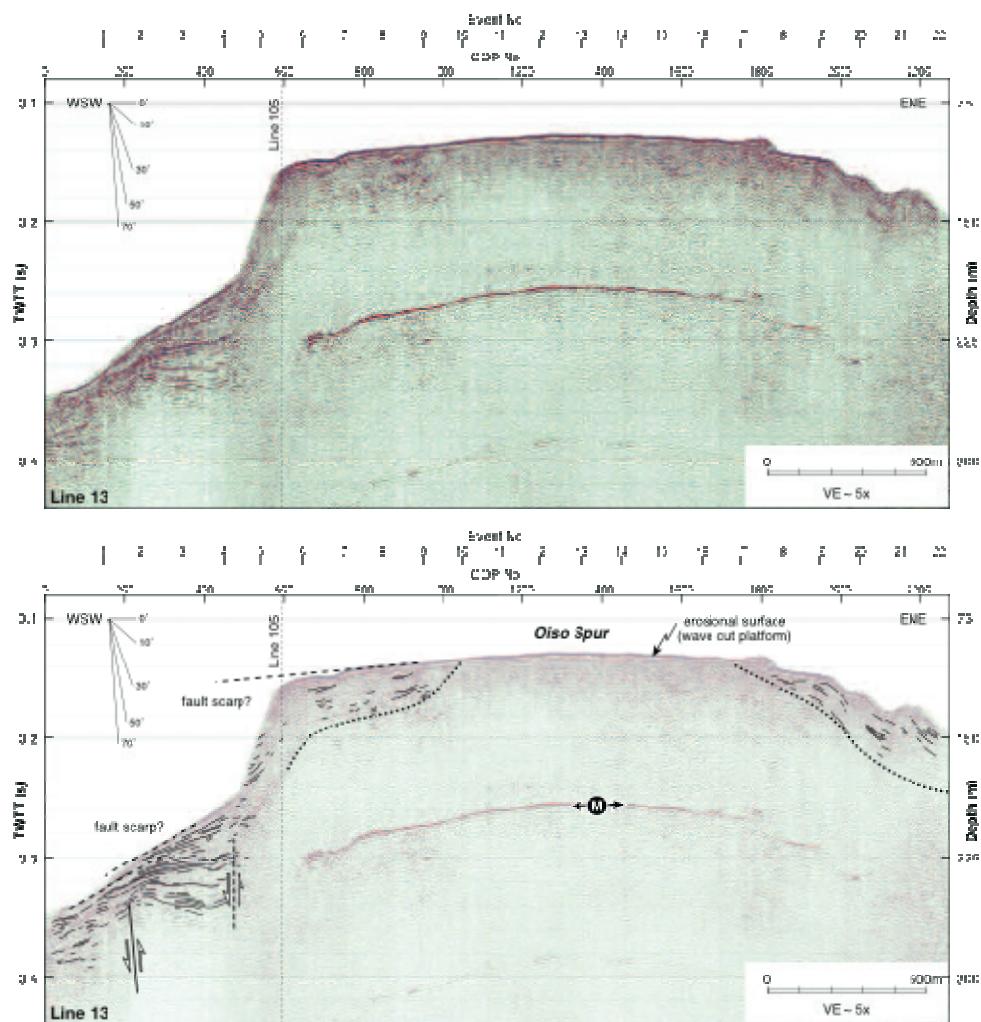


図 10 測線 13-2 の重合断面および解釈断面。

(上) 重合断面、(下) 解釈断面。

大磯海脚を東北東-西南西方向（測線 10-13）および北西-南東方向（測線 105、X1-X3）に横切る測線で取得された反射記録からは、同海脚が、1) 中一南東部に分布する火山岩類とみられる反射面に乏しい地層とそれをアバットするよう覆う明瞭な反射面で特徴付けられる堆積岩が海脚西-北西部に分布すること、2) それらが褶曲変形を受けていること、3) 最終氷期の低海面期にそれらを切って平坦面（波食棚）が形成されたことが明らかになった（図 9-図 12）。

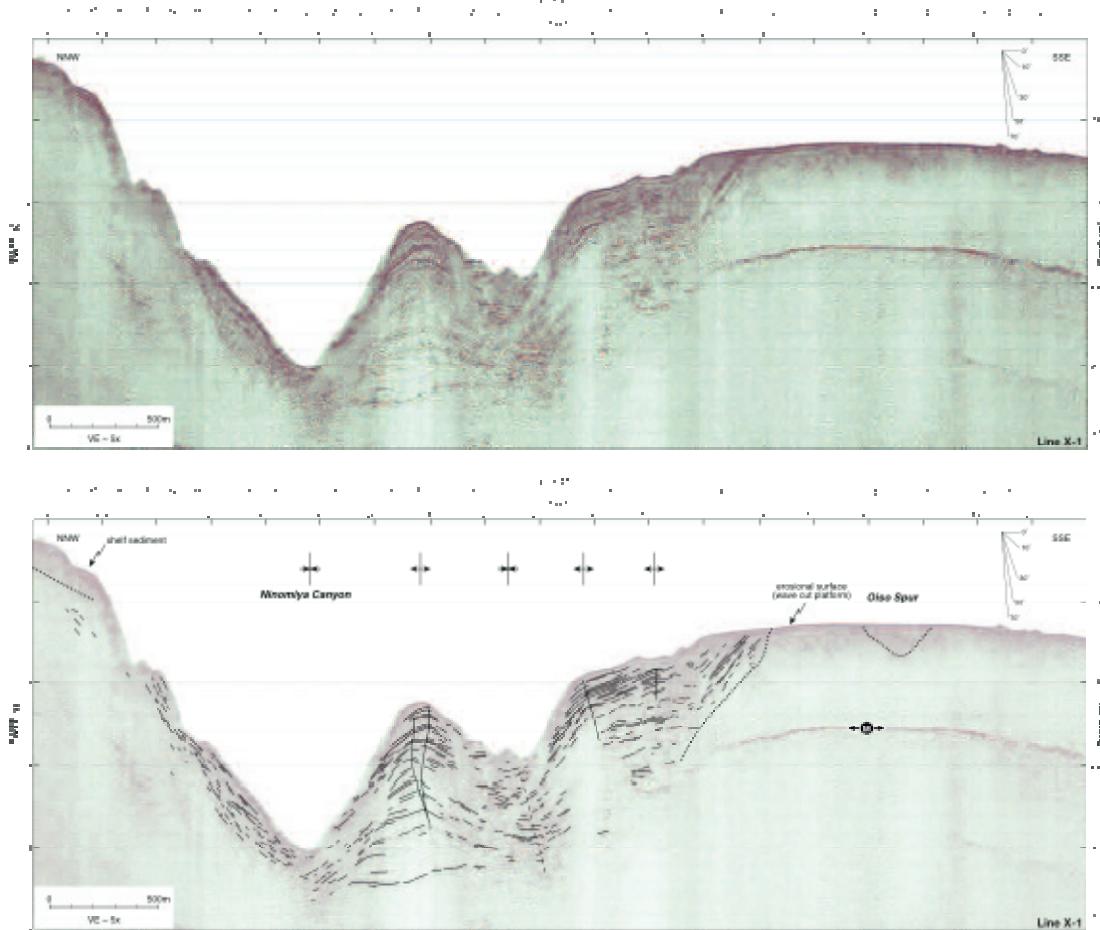


図 11 測線 X-1 の重合断面および解釈断面。

(上) 重合断面、(下) 解釈断面。

大磯海脚に分布する褶曲構造については、1980 年前後に海上保安庁水路部が取得したシングルチャンネルの音波探査記録の再検討を行った大河内（1990）によると、北西一南東方向に軸を持つ背斜構造が認定されていた。一方、今回取得した反射断面によると、褶曲群の軸跡は北東-南西-東北東-西南西方向に延びる（図 5、図 11、図 12）。この褶曲軸の延びの走向は、二宮海底谷の延びの方向や同海底谷の陸上延長部で確認されている生沢断層系の走向と一致し、国府津-松田断層の走向と大きく斜交している（図 5）。

大磯海脚を構成する地層に発達する北東-南西に軸跡をもつ褶曲群の大部分は最終氷期に形成されたとみられる侵食面に変形を及ぼしていない（図 11、12）。しかしながら、測線 X-2 の反射記録には、褶曲群のうち最も北西側の背斜の直上にあたる測位番号 24 付近で、侵食面およびそれを覆う陸棚堆積物に比高約 0.064 秒のバルジ状の高まりが生じている（図 12）。こうした高まりが初生的な侵食および堆積構造である可能性は完全に排除することはできないものの、高まりの位置と形状が侵食面下に認定される背斜と一致していることから、褶曲の一部は、最終氷期以降にも成長した可能性がある。ただし、この背斜軸の北東延長部を横

切る測線 104 では、反射記録が不鮮明なため明言できないものの、測位番号 13～14 付近の背斜構造を覆って分布する後氷期海水準上昇期に堆積したとみられる地層に変形を与えていないようみえる（図 13）。

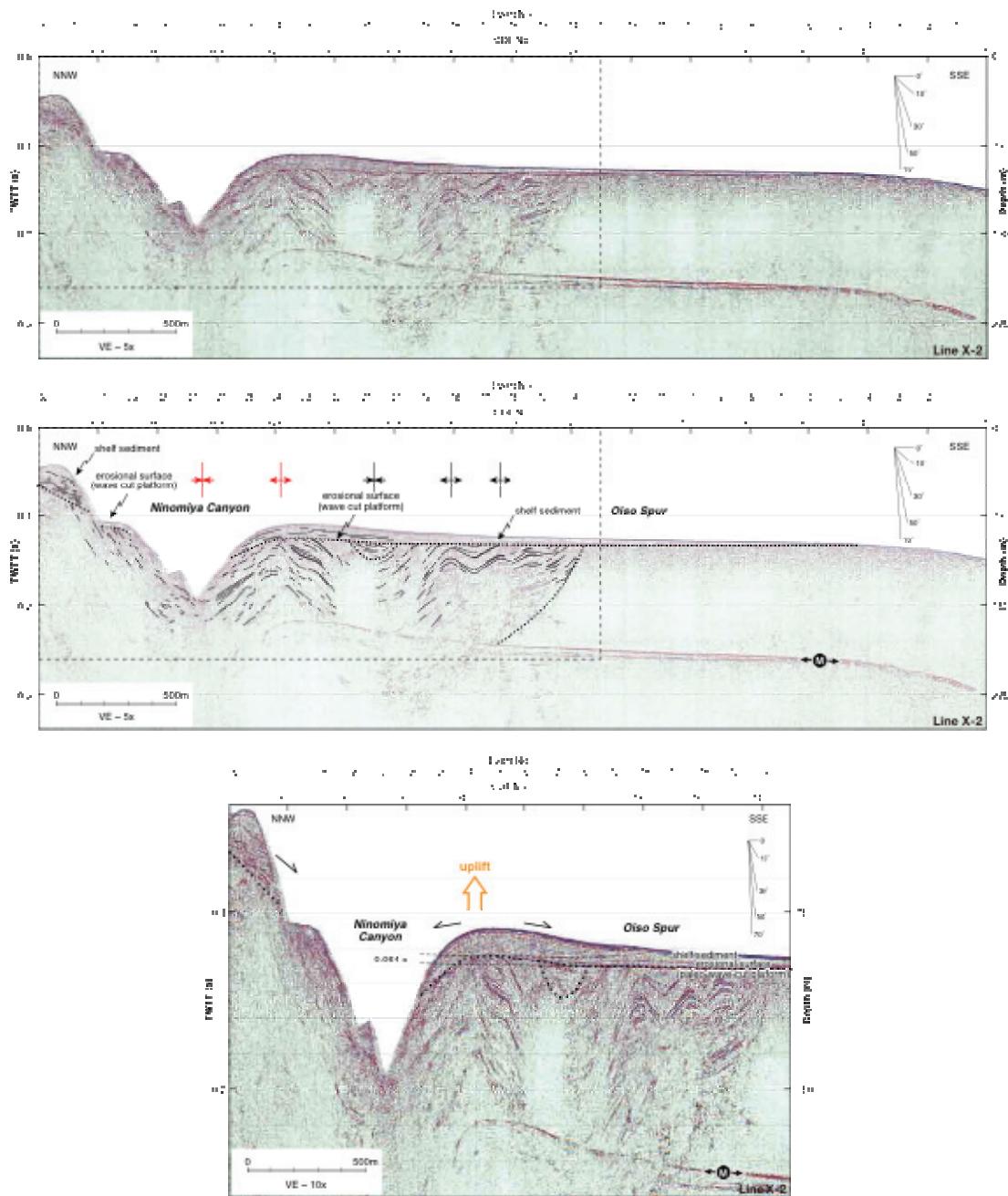


図 12 測線 X-2 の重合断面および解釈断面。（上）重合断面、（中）解釈断面、（下）褶曲部分の拡大図（図の範囲を図 12a, b の黒破線で示す）。

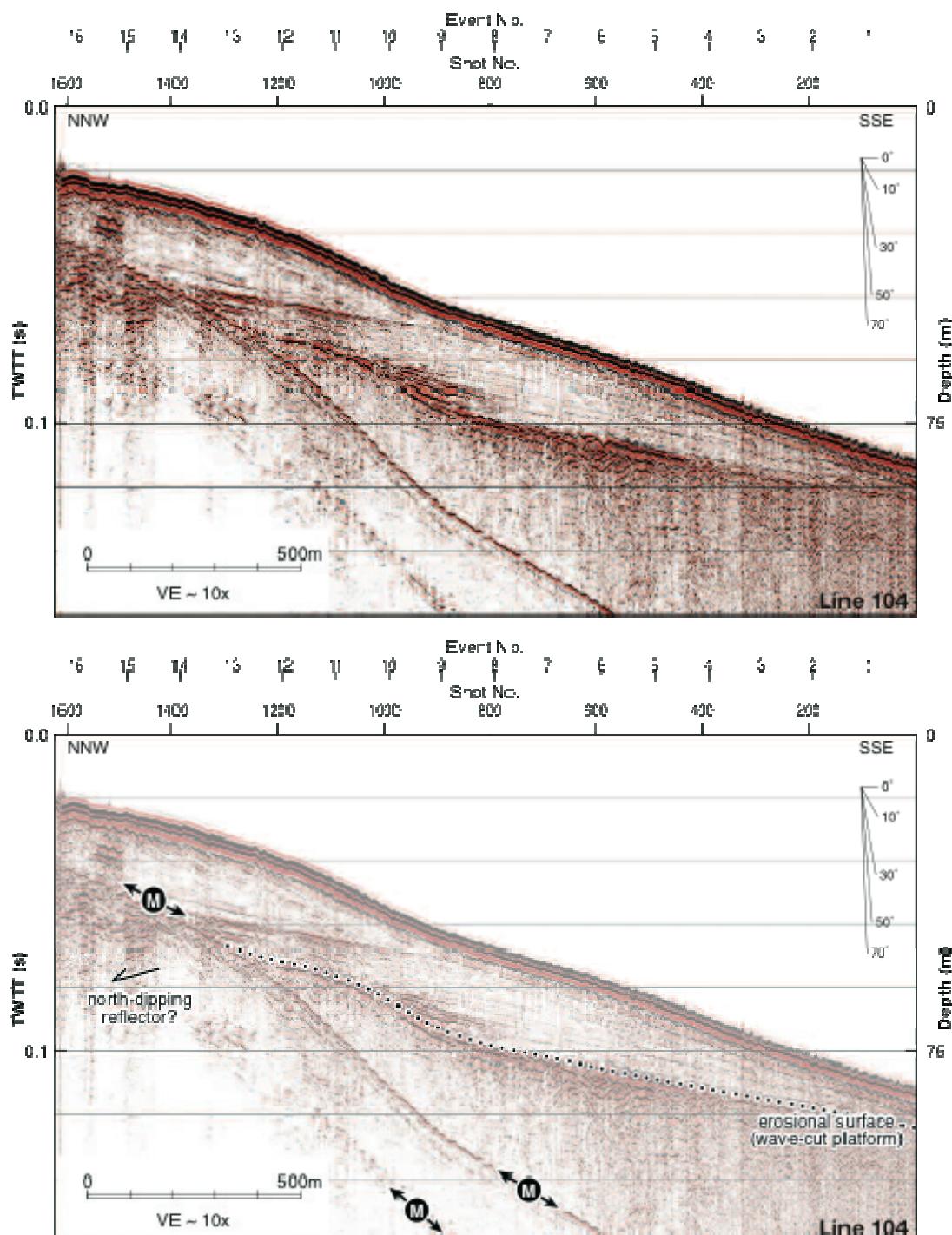


図 13 測線 104 の重合断面および解釈断面。

(上) 重合断面、(下) 解釈断面。

大磯海脚と大磯丘陵を境するように南西に流下する二宮海底谷に沿って、陸上延長部で認定されている生沢断層系が連続すると指摘されてきた（例えば、関東第四紀研究会, 1987；伊藤ほか, 1988；森ほか, 2010）（図 1）。二宮海底谷を横切る測線（測線 X-1 ～X-3）の反射断面には、断層の存在を示唆する反射面の不

連續は認められない（図 11, 図 12）。ただし、いずれの測線とも海底谷に一致するところで向斜構造の存在を示唆する下に凸状の反射パターンを呈している。こうした構造は、海底谷下あるいはその周辺に伏在する断層に関連して形成された褶曲である可能性がある。ところで、大磯丘陵南縁には海岸沿いに広く縄文海進期に形成された海成段丘面が分布している（例えば、米倉ほか, 1968; 遠藤ほか, 1979; 小池・町田編, 2001）。小池・町田編（2001）によると、その内縁高度分布（旧汀線の高度）は、二宮海底谷の陸上延長で周囲に比べて低い。こうした段丘の高度分布と反射記録から推定された二宮海底谷沿いの向斜構造は、位置、形態とともに調和的である。

以上のように、本研究により、国府津－松田断層の走向延長部の沿岸海域において、同断層の連續を示唆する反射パターンが認められ、またその上盤側にあたる大磯海脚や二宮海底谷では、国府津－松田断層の走向と大きく斜交する方向に延びる褶曲構造の存在が認められ、その一部は最終氷期以降にも活動している可能性が示された。こうしたトラフ軸方向と直交する構造により国府津－松田断層や相模湾断層などのプレート境界断層の分岐断層群がセグメント化している可能性が佐藤ほか（2010a, 2010b）により指摘されている。ただし、今年度の調査で用いた音源のエネルギーが弱いため、変形構造の実体に関して不明な点が残されている。ところで、これらの構造の活動性を定量的に評価するためには、地層の年代に関する情報が必要である。しかしながら、今回取得した探査記録をみる限り、年代試料が豊富に含まれ、かつ連續的に地層が堆積している場所は認められなかった。

（c）結論ならびに今後の課題

相模湾北西部における活構造の分布および活動様式を把握するため、同海域に設けた 17 測線（延べ測線長約 108 km）でブーマーを音源とする高分解能マルチチャンネル音波探査を実施した。取得した音波探査データについて共通反射点重合処理を行った結果、相模湾北西沿岸海域、二宮海底谷および大磯海脚で海面から往復走時で最大約 0.4 秒（深度約 300 m）までの深度における地質構造をイメージングすることができた。二宮海底谷より北の沿岸海域では、大磯丘陵西縁を限る国府津－松田断層のほぼ延長部において、東傾斜の逆断層の存在を示唆する反射面の不連續が認められた。一方、国府津－松田断層の東側（上盤側）に分布する二宮海底谷および大磯海脚を構成する地層中には、同断層の走向と斜交する北東-南西方向に軸をもつ複数の褶曲構造が認められ、その一部には、最終氷期に形成されたとみられる海食台（海脚平坦面）に背斜状の変形を示唆する反射パターンが認められた。本調査の結果および海岸周辺部の地質構造・変動地形に関する既存の成果に基づくと、国府津－松田断層上盤側の地質構造は、二宮海底谷付近を境に南北で不連續となっている可能性がある。ただし、今年度の調査で用いた音源のエネルギーが弱いため、変形構造の実体に関して不明な点が残されている。そこで、平成 23 年度の調査では、変形構造の実体解明および断層の分布、変

位のセンスなど活動様式を明らかにするため、よりエネルギーの大きいウォーターガンを震源とする音波探査の実施を予定している。

謝辞

本調査を実施するにあたり、神奈川県安全防災局危機管理部災害対策課、同環境農政局水・緑部水産課、同国土整備局河川下水道部砂防海岸課、同温泉地学研究所、神奈川県行業協同組合連合会、小田原市漁業協同組合、二宮町漁業協同組合、大磯町漁業協同組合、海上保安庁第三管区海上保安本部交通部安全課のご関係の皆様には、調査の計画段階からご協力、ご指導を賜りました。調査船の借り上げと調査の実施に際しては、小田原市漁業協同組合にご協力いただきました。丸山かおる氏をはじめとする総合地質株式会社の調査スタッフの皆様には、調査全般についてご協力いただきました。産業技術総合研究所の村上文敏、井上卓彦、楮原京子の各氏には、音波探査データの解析についてご教示いただきました。以上の皆様に厚く御礼申し上げます。

(d) 引用文献

- 1) 井上卓彦・村上文敏・岡村行信・池原 研, 2007年能登半島地震震源域の海底活断層, 地震研究所彙報, 82, 301-312, 2007.
- 2) 伊藤谷生・上杉 陽・千葉達朗・関東第四紀研究会, 大磯丘陵南東部, 生沢断層系の第四紀後期活動史, 日本地質学会学術大会講演要旨, 95, 446, 1988.
- 3) 遠藤邦彦・関本勝久・辻誠一郎, 大磯丘陵南西部, 中村原下流域の完新世の層序と古環境, 日本大学文理学部自然科学研究紀要, 14, 9-28, 1979.
- 4) 海上保安庁, 海底地形図(5万分の1)「相模湾北西部」, 6362, 1992.
- 5) 関東第四紀研究会, 大磯丘陵の層序と構造, 関東の四紀, 13, 3-46, 1987.
- 6) 活断層研究会編, 「新編日本の活断層—分布と資料—」, 東京大学出版会, 437p, 1991
- 7) 楠 勝浩・菊地真一・穀田昇一・深江邦一, 相模湾北西海域における変動地形調査, 水路部研究報告, 27, 113-131, 1992.
- 8) 小池一之・町田 洋編, 日本の海成段丘アトラス, 105p, CD-ROM 3枚・付図2葉, 2002.
- 9) 森 慎一・藤岡換太郎・有馬 真, 相模トラフ北部の海底地形と断層系の形成—5系統の断層発達史—, 地学雑誌, 119, 585-614, 2010.
- 10) 村上文敏, ショートマルチ音波探査装置の開発 沿岸海域の高分解能音波探査装置を目指して, 産総研 TODAY, 7 (10), 30, 2007.
- 11) 村上文敏・西村清和・松岡弘和・古谷昌明・丸山かおる・半場康弘・立石雅昭, 浅海域音波探査用 12 チャンネル受信ケーブルの作成と海域実験, 海洋調査技術学会 16 回研究成果発表会講演要旨集, 45-46, 2004.
- 12) 大河内直彦, 相模湾の活構造とテクトニクス, 地学雑誌, 99, 458-470,

1990.

- 13) 岡村行信, 2010, 2007 年中越沖地震震源域及び佐渡海盆の活構造, 活断層研究, 33, 15–25, 2010.
- 14) 中田 高・今泉俊文編, 活断層詳細デジタルマップ, 東京大学出版会, 60p, DVD-ROM 2 枚・付図 1 葉, 2002.
- 15) 佐藤比呂志・岩崎貴哉・飯高 隆・藏下英司, 制御震源地震探査による地殻構造の解明, 神縄・国府津一松田断層帯における重点的な調査観測, 平成 21 年度成果報告書, 5-47, 2010a.
- 16) 佐藤比呂志・岩崎貴哉・石山達也, プレート境界から分岐した活断層の長期評価, 科学, 80, 825–831, 2010b.
- 17) 杉山雄一・岡村行信・武田伸勝・丸山かおる, 九州中部, 島原湾と橘湾における雲仙断層群の音波探査, 活断層・古地震研究報告, 10, 149–194, 2010.
- 18) 渡辺一樹, 相模湾西部の海底微地形, 水路部研究報告, 29, 33–50, 1993.
- 19) 米倉伸之・鈴木郁夫・長谷川太洋・上杉 陽・遠藤邦彦・岡田篤正・河名俊男・石川佳代・福田正己, 相模湾北岸の沖積段丘、とくに下原貝層の C-14 年代について、第四紀研究, 7, 49–55, 1968.

(3) 平成 23 年度業務計画案

平成 22 年度に小田原から大磯にかけての相模湾北西沿岸海域において実施したブーマーマルチチャンネル音波探査により、国府津一松田断層延長部の活動に関連する可能性を示唆する浅層部の変形構造が認められた。ただし、音源のエネルギーが弱いため、変形構造の実体に関して不明な点が残されている。そこで、変形構造の実体解明および断層の分布、変位のセンスなど活動様式を明らかにするため、よりエネルギーの大きいウォーターガンを震源とする音波探査を実施する。