

陸海接合の物理探査

越後平野西部の沿岸陸域における浅部地下構造調査

山口和雄¹・住田達哉¹・加野直巳¹・大滝壽樹¹・伊藤 忍¹・横田俊之²・横倉隆伸¹

Keywords : seismic reflection survey, subsurface structure, Echigo plain, Nagaokaheiya-seien fault zone, Kakudayama fault

要旨

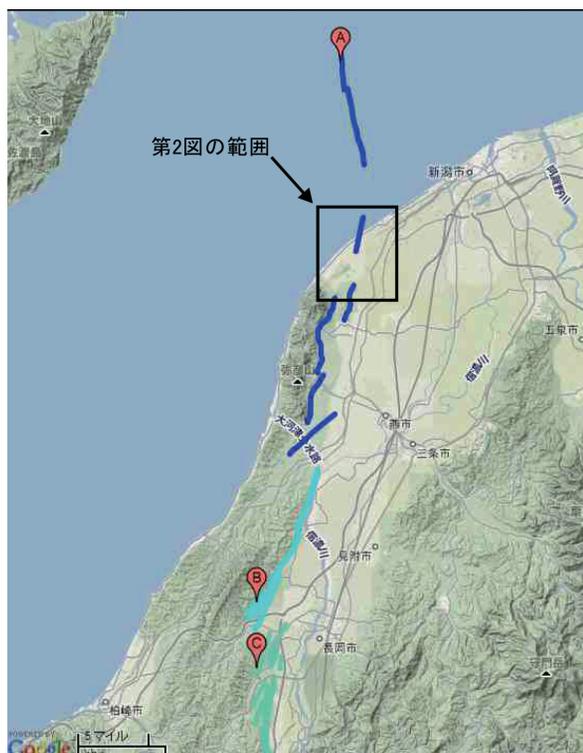
沿岸の地下構造データの空白域において、海域データと陸域データを繋ぐには海域から陸域まで連続した反射法地震探査が必要である。そのような反射法の適用実験の前段階として予察的な調査を行った。海陸にまたがる断層が存在する越後平野西部で海岸線に近接し並行する陸域測線を設定し、数 10m から 500m の深度範囲を対象として測線長約 10km の反射法地震探査を実施した。測線西側では深度 1000m 程度まで反射面が捉えられ、角田山から続く傾斜面、西山層基底、不整合等の地下構造解釈が可能である。断層推定位置およびその東側は深度 200m 以浅のみの反射面検出にとどまったが、断層推定位置付近の深度 100m 前後で地層変形が認められた。

1 はじめに

長岡平野西縁断層帯は、新潟市の沖合から越後平野西方の角田山・弥彦山等の山地・丘陵と平野部との境界付近に分布する活断層である(第 1 図)。越後平野やその周辺では石油・天然ガス探鉱や原子力発電所の耐震安全性評価等のために数多くの地下構造調査が行われてきた。それら調査により、本断層帯は南北走向で複数セグメントに分けられること、西側が東側に乗り上げる逆断層であること、西側隆起の変位地形と地質構造を形成すること、場所によっては幅 1km に及ぶ撓曲を伴うこと、120 万年前の地層が 3000m 以上上下変位しており平均変位速度は 3m/千年と見積もられること、などが分かっている(地震調査研究推進本部, 2004; 産業技術総

合研究所, 2007)。

角田山東縁断層は本断層帯の北部に位置し、新潟市の沖合海域と越後平野西縁の陸域とにまたがって分布する断層と考えられている(地震調査研究推進本部, 2004)。一般に極浅海域や海岸線に近い陸域は地質調査や地下構造調査の制約条件等のために地質情報の空白域となっており、本断層



第 1 図 長岡平野西縁断層帯。
産業技術総合研究所 (2007) の活断層データベースに第 2 図の範囲を加筆した。

Fig. 1 Nagaokaheiya-seien fault zone.
The base map is from the active fault database of Japan (AIST, 2007). The square is the area of Fig. 2.

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, Institute of Geology and Geoinformation)

² 産業技術総合研究所 地質調査総合センター 地圏資源環境研究部門 (AIST, Geological Survey of Japan, Institute for Geo-Resources and Environment)

は海岸線からそれぞれ数 km 離れた海域と陸域の地点で確認された地層変形に基づいて海陸の連続性が推定されている。

沿岸空白域の地下構造を正しく把握するためには、浅海域での音波探査、海岸線に接近した陸域での反射法地震探査とともに、両者を繋ぐ手段として海域から陸域まで連続した反射法地震探査のデータ

取得やデータ処理の技術開発が必要である。そのような海陸接続の反射法を行う前の予察的調査として、今回、上記 2 地点の中間位置を通り海岸線に近接し並行する陸域測線において、比較的浅い数 10m から 500m の深度範囲を対象とした反射法地震探査を実施した。



第 2 図 新潟 1 測線と周辺の反射法地震探査測線。

赤線が新潟 1 測線の CMP 測線で赤数字は CMP 番号。赤線とほぼ重なる黒線が発震点・受振点位置を表し黒数字は測点番号。その他の黒線は既往の反射法地震探査測線で、SN90-A、SN90-9 は石油公団（1991）、SN91-1 は石油公団（1992）、加野ほかは加野ほか（1999）、Y07-P1 は（東京電力、2008）、黒丸は宮地ほか（2009）のボーリング位置を示す。オレンジの破線は、SN90-A、SN90-9、Y07-P1 の反射断面で断層と解釈された位置を結んだものである。基図として国土地理院の数値地図 50000 内野、弥彦を利用した。

Fig. 2 Niigata 1 seismic line and previous seismic lines.

The red line is the Niigata 1 CMP line and red numbers CMP numbers. The black line overwritten by red line is Niigata 1 survey line and black numbers source/receiver numbers. Other black lines are previous seismic lines. SN90-A and SN90-9 are from JNOC(1991), SN91-1 from JNOC(1992), Y07-P1 from TEPCO(2008), respectively. The black circles are boring sites of Miyach et al.(2009). The broken orange line connects fault positions interpreted as fault in the previous seismic surveys above. The base map is digital map 50000 Uchino and Yahiko of Geographical Survey Institute.

2 調査地域の概要

調査地域は新潟市の越前浜から新川河口を経て五十嵐浜に至る陸域である（第2図）。越後平野には複数の砂丘列が存在し、調査地域の砂丘は新砂丘Ⅲに分類される（新潟市，1991）。調査地域周辺の既往の反射法地震探査は、海岸線に並行する海域のSN90-A測線と、海岸線に直交し海陸にまたがるSN90-9測線があり、それぞれの反射断面で往復走時4s程の深部から200ms付近の浅部に達する西側隆起の逆断層が解釈され、この断層は陸海で連続するものとされている（石油公団，1991）。調査地域の数km南方のY07-P1の反射断面では、深度3000mから300mに西上がりの逆断層が解釈されている（東京電力，2008）。

3 反射法地震探査の概要

反射法の調査測線（新潟1測線）は、越前浜から新川河口付近までは国道402号線、新川の東側は市道と農道に設定した。測線長は10.6km、測線から海岸線までの距離は200m～300m、新川河口横断部と五十嵐三の町と二の町付近で測線が屈曲する以外は直線状である。新潟1測線の標高は、新川付近以外は概略4mから13mの範囲にある（第2図の下図）。

主要な探査諸元を第1表に示す。受振器は、間隔10mでエレメント6個をまとめ置きするバンチングとし、国道402号線と五十嵐二の町集落の東側では道路脇の地面にスパイクで刺し、新川河口排水機場内や五十嵐二の町の集落内では粘土に載せて舗装面上に置いた。発震は10m間隔の受振点を4等分して2.5m毎の位置とした。受振器のバンチングと2.5m間隔の発震は、浅部の分解能を出来るだけ向上させることを目的としている。探査機の同時収録チャンネル数は144とした。発震・受振展開は、固定した144受振点の西端から発震を開始し48受振点目までの発震終了後に受振点を48点分だけ東へずらす方式とした。従って、発震・受振の最大オフセットは発震位置により1440mから960mの間で変化する。

第3図に発震位置1km毎のショット記録例を示す。標準2回の垂直重合と振幅調整を適用した。測線の大部分を占める国道402号線は交通量が多く車両ノイズが顕著であった。測線西部では、初動は発

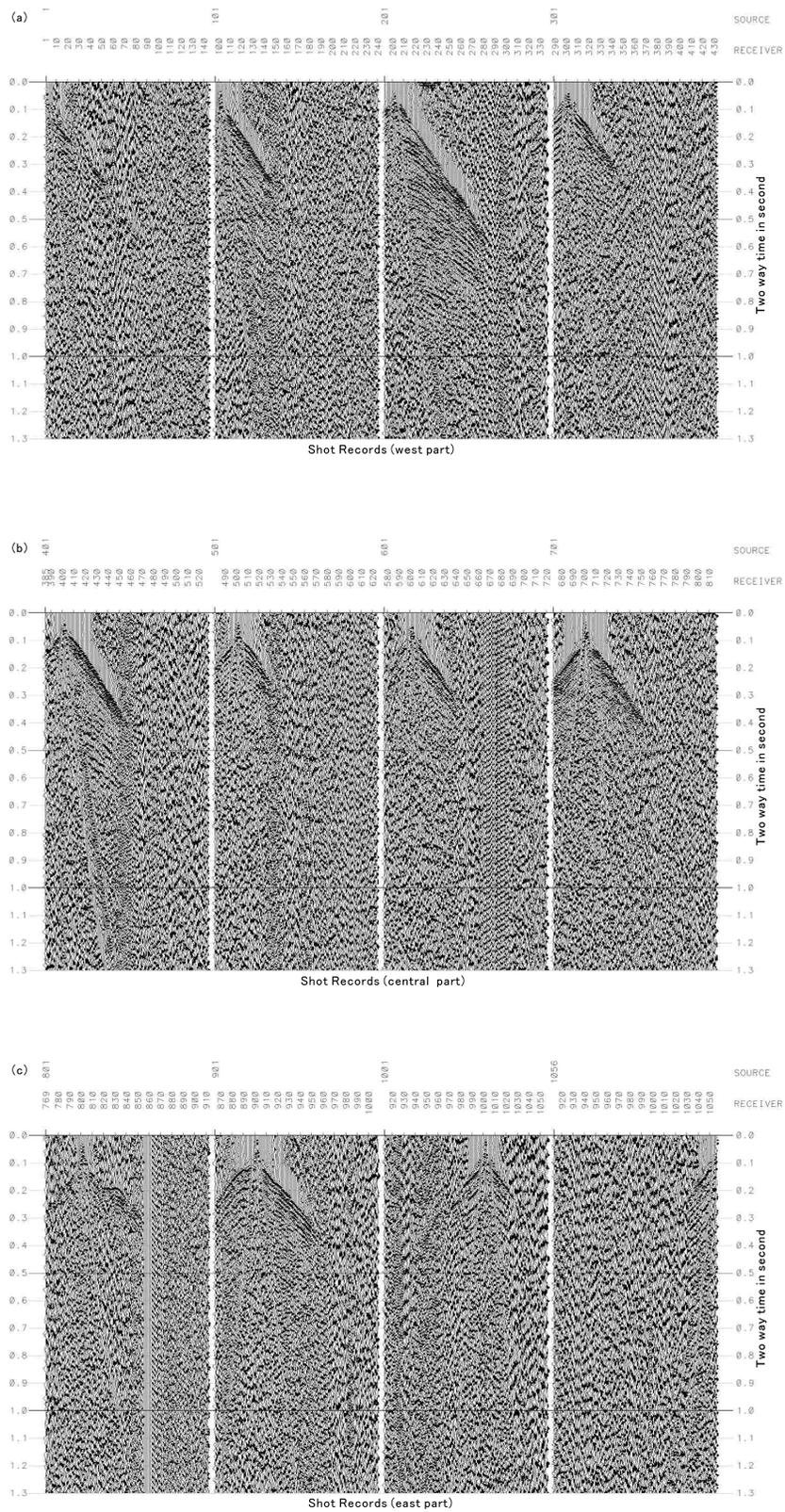
震点201でオフセット約800m、発震点401でオフセット約600mまで届き、これらの記録では往復走時500ms以深まで反射波が確認出来る。断層付近と思われる発震点501は著しく記録が悪い。測線東部では、発震点701、901で初動はオフセット600mまで達するが、反射波は300ms付近より浅部に限られる。発震点1001、1056では記録が悪くなる。

新潟1測線の数km南方の東西測線で行われた今回と同型の震源による反射法地震探査で、断層推定位置の西側の発震では初動が1km程度届いていたが、東側では震源エネルギーの減衰が大きく初動が遠方まで届かなくなった（加野ほか，1999）。減衰の原因として、加野ほか（1999）は地表付近の天然ガスの小さな気泡あるいは浅部のガス胚胎層を考えている。新潟市（1991）によれば、調査地付近の最上部のガス層は最終氷期の埋没段丘礫層（G1層）であり、この層は新潟1測線では測線中部から東部

第1表 探査諸元。

Table1 Survey parameters.

| | |
|-------------|-----------------------------|
| 測線名 | 新潟1 |
| 震源 | MiniVib T15000(IVI社) |
| 発震点間隔 | 2.5m |
| 総ショット数 | 4147ショット(垂直重合後) |
| スイープ周波数 | 15 - 120Hz |
| 発震パタン | 1箇所固定 |
| スイープ回数/発震点 | 標準2回 |
| スイープ長 | 13s |
| 受振器 | UM2(MarkProducts社) |
| 受振点間隔 | 10m |
| 総受振点数 | 1056点 |
| 固有周波数 | 10Hz |
| 受振器個数/受振点 | 6個をバンチング |
| 展開 | 144受振点を固定し、西端から48点目の受振点まで発震 |
| 発震受振最大オフセット | 1440m(西端)～960m(48点目) |
| 探査機 | DAS1(OyoGeospace社) |
| チャンネル数 | 144ch |
| 記録長 | 3.384s(コリレーション後) |
| サンプリング間隔 | 2ms |
| CMP重合数 | 平均288 |
| CMP番号 | 3 - 2051 2049CMP s |
| CMP間隔 | 5m |
| CMP測線長 | 10.24km |



第 3 図 ショット記録例。

(a), (b), (c) 測線西端から 1km 毎のショット記録を示す。各記録の上部の上の数値が発震点, 下の数値が受振点番号を示す。2 回の発震を垂直重合し振幅調整している。

Fig. 3 Examples of shot record.

(a),(b),(c) Every 1 km shot records are shown with 2 fold vertical stacks and gain recovery. Numbers above each record are source and receiver point numbers, respectively.

で深度 125m から 150m に分布する。新潟 1 測線でも、このガス層の影響により震源エネルギーの減衰が生じたものと考えられる。

4 反射断面

得られたデータは通常の CMP 重合法（例えば、水越・田村（1998））でデータ処理した。垂直重合では、2.5m 毎のショット記録をダイバーシティスタックし 1 つのショット記録とした。静補正値は、オフセット 40m ～ 200m の範囲の初動データを用いて、第 1 層の速度を 700m/s と仮定し、拡張された Generalized Reciprocal Method で求めた。デコンボリューションは予測距離 4ms のプレディクティブタイプ、バンドパスフィルタ通過帯域はスイープ周波数と同じ 15 ～ 120Hz とした。CMP ソートでは CMP 間隔を 5m とした。2.5m の発震点間隔で処理しているので、平均的な CMP 重合数は 288 である。速度解析は CMP100, 400, 800, 1200, 1600, 1900 の 6 箇所、隣接する 11CMP ギャザで速度スペクトル、5 ギャザで定速度重合パネルを作成し、両者を見比べて適切と思われる速度をピックアップした。残留静補正は surface consistent 型の統計処理を適用した。NMO 補正では、浅部の分解能を上げる目的で 175%以上の伸張波を除去（ストレッチミュート）した。マイグレーションは周波数-空間領域 (f-x) の方式とし、速度解析により決めた速度データを水平方向と時間方向に平滑化した速度を用いた。深度変換でもこの平滑化した速度を使用した。

第 4 図に CMP 重合時間断面、マイグレーション時間断面、深度断面を示す。データ処理の基準面は標高 0m とし、反射断面の走時ゼロ、深度ゼロは標高 0m である。西端の深度 600m, 300m から東傾斜するイベントは、それぞれ CMP300 深度 1200m, CMP600 深度 800m まで続く。CMP250 から 600 深度 150m から 500m の範囲のイベントは並行で東傾斜である。CMP750 から 850 深度 100m から 600m にも東傾斜のイベントがある。断面全体に渡っては深度 30m から 200m にイベントがみられる。

5 考察

深度断面を地質解釈した（第 5 図）。SN90-A と SN90-9 の反射断面の地質解釈（石油公団, 1991）

と地質断面図（新潟市, 1991）を参照すると、反射面 A は角田山・弥彦山に露出する寺泊層・七谷層に相当し、反射面 B は椎谷層基底に相当すると考えられる。CMP300 深度 130m 付近（第 5 図 C）で下位の傾斜反射面が上位の反射面のところで途切れており、深度 130m 付近の反射面は不整合面と解釈出来る。CMP800 付近（同 D）の傾斜反射面は、これを北方に投影した位置の SN90-A の反射断面にも類似した短い傾斜反射面が見られることから真の構造と考えられるが、どのような地層に対応するのか不明である。SN90-A と SN90-9 の 2 つの反射断面で解釈された断層線を結んだ線は、新潟 1 測線と CMP1150 付近で交差する。この付近の反射断面（同 E）は東側低下の変形を示し、地下深部の断層変位を反映していると考えられる。

6 まとめ

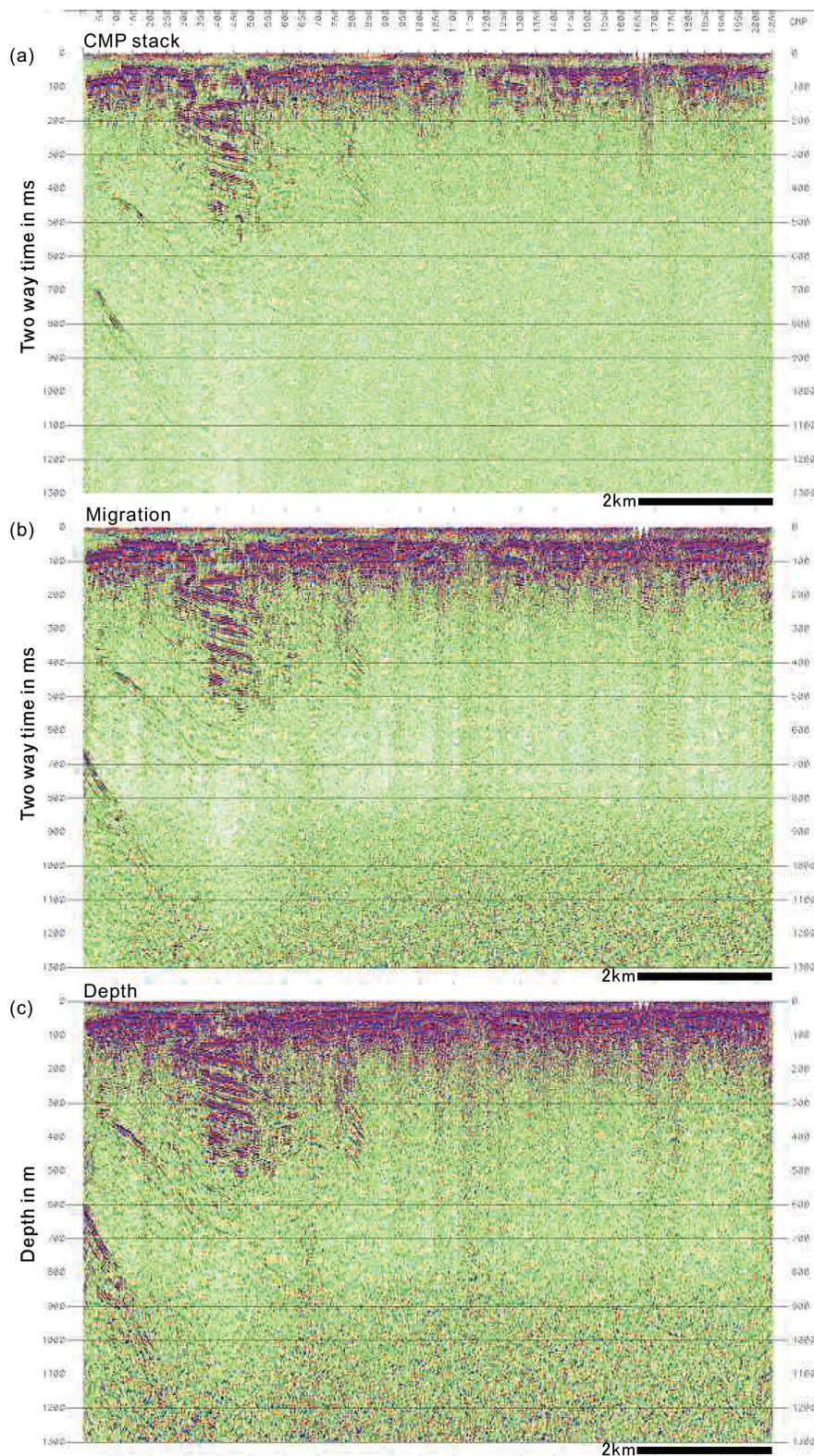
沿岸の地下構造データの空白域において、海域データと陸域データを繋ぐには海域から陸域まで連続した反射法地震探査が必要である。そのような反射法の適用実験の前段階として予察的な調査を行った。海陸にまたがる断層が存在する越後平野西部で、海岸線に近接し並行する陸域測線を設定し、数 10m から 500m の深度範囲を対象として測線長約 10km の反射法地震探査を実施した。測線西側では深度 1000m 程度まで反射面が捉えられ、角田山から続く傾斜面、椎谷層基底、不整合等の地下構造解釈が可能である。断層推定位置およびその東側は深度 200m 以浅のみの反射面検出にとどまったが、断層推定位置付近の深度 100m 前後で地層変形が認められた。今後、実施を計画している海陸接続の反射法地震探査と合わせて、今回の反射データの詳細な解析と地質解釈を進める予定である。

謝辞：反射法地震探査を実施するにあたり、新潟大学の卜部厚志准教授、新潟市役所、新潟県巻農業振興部、農林水産省新川流域農業水利事業所、五十嵐二の町自治会、五十嵐二の町共有地組合のご協力をいただいた。記して感謝の意を表します。

文献

地震調査研究推進本部（2004）、長岡平野西縁断層帯の長期評価について、http://www.jishin.go.jp/main/chousa/04oct_nagaoka/index.htm.

- 加野直巳・山口和雄・粟田泰夫（1999），角田・弥彦
断層群の P 波反射法地震探査，地質調査所速報，
no.EQ/99/3（平成 10 年度活断層・古地震研
究調査概要報告書），47-58.
- 宮地良典・中西利典・ト部厚志・田辺 晋・稲崎富士・
安井 賢・小松原琢・水野清秀（2009），ボー
リングコア解析による角田・弥彦断層の活動
度評価，本報告書.
- 水越郁郎・田村八洲夫（1998），反射法地震探査 物
理探査ハンドブック，物理探査学会，49-76.
- 新潟市（1991），新潟市史 資料編 12 自然 I 地学，
新潟市史編さん自然部会，1-162.
- 産業技術総合研究所（2007），活断層データベース
2007 年 12 月 13 日版 産業技術総合研究所
研究情報公開データベース DB095，産業技術
総合研究所. [http://riodb02.ibase.aist.go.jp/
activefault/index.html](http://riodb02.ibase.aist.go.jp/activefault/index.html)
- 石油公団（1991），平成 2 年度国内・石油・天然ガ
ス基礎調査 海上基礎物理探査「新潟～富山
浅海域」調査報告書，28p.
- 石油公団（1992），平成 3 年度国内・石油・天然ガ
ス基礎調査 海上基礎物理探査「新潟～富山
浅海域」調査報告書，29p.
- 東京電力（2008），新潟県中越沖地震に対する柏崎刈
羽原子力発電所の耐震安全性の検討状況につ
いて 敷地周辺陸域の地質調査結果 ー長岡
平野西縁断層帯を中心としてー，[http://www.
tepco.co.jp/cc/direct/08032701-j.html](http://www.tepco.co.jp/cc/direct/08032701-j.html).

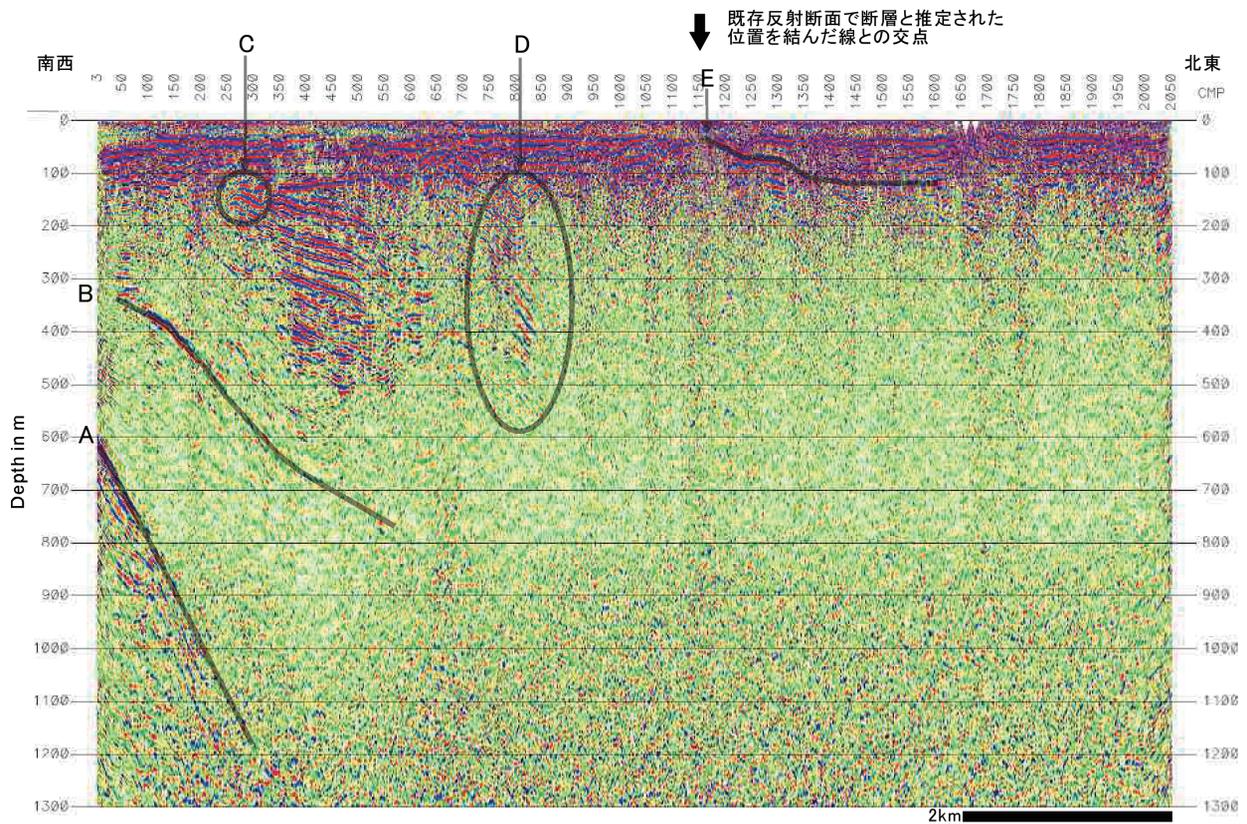


第 4 図 各種反射断面.

(a)CMP 重合時間断面, (b) マイグレーション時間断面, (c) 縦横比 5:1 の深度断面.

Fig. 4 Seismic sections.

(a) CMP stacked time section, (b) migrated time section and (c) depth section of fivefold vertical exaggeration.



第 5 図 地質解釈。
 深度断面に地質解釈を書き入れた。太い矢印は第 2 図のオレンジ破線と新潟 1 測線の交差箇所を示す。深度断面の縦横比は 5:1 である。

Fig. 5 Geological interpretation of depth section.
 Geological interpretation is added to the depth section of fivefold vertical exaggeration. The bold arrow shows the cross point of the broken orange line of Fig.2.