

## 広帯域地震計にて得られた人工地震と反射法測線にて観測された自然地震

大滝壽樹<sup>1</sup>・伊藤 忍<sup>1</sup>・加野直巳<sup>1</sup>・横倉隆伸<sup>1</sup>・山口和雄<sup>1</sup>

Toshiki Ohtaki, Shinobu Ito, Naomi Kano, Takano Yokokura and Kazuo Yamaguchi (2006) Artificial earthquakes observed by using a broadband seismometer and natural events during a seismic reflection survey. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 57(1/2), p.51 - 55, 8 figs.

**Keywords:** Reflection Seismology, Broadband Seismometer

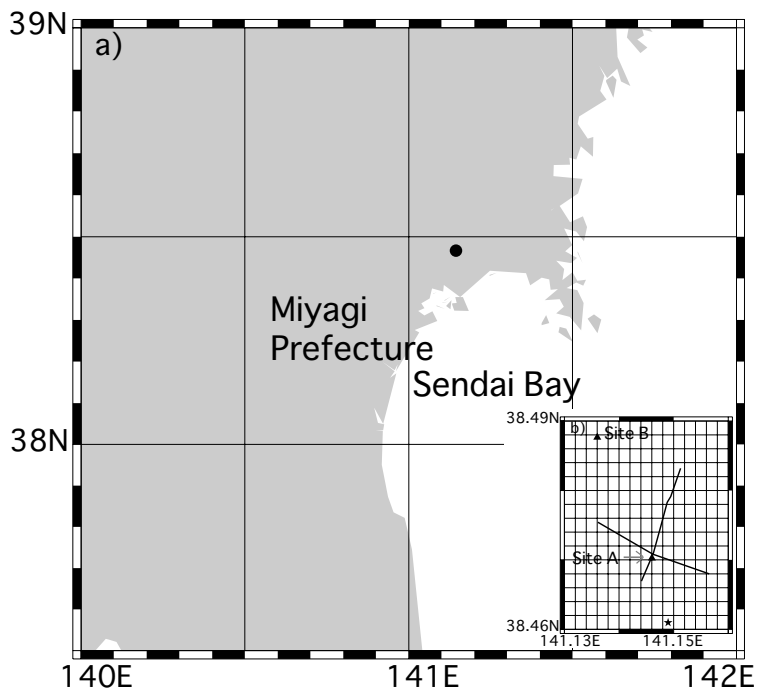
### 1. はじめに

我々は今まで反射法による地下構造探査を行ってきた (e.g., 山口ほか, 2000) が, 機材の制約上, 発震点と受振点間の最大オフセットは 1.5 km 程度であることが多く, より離れた地点ではほとんど観測を行っていなかった. また, 余震が続いている地域にて地下構造探査を行うことが今後増えてくると考えられるが, その際に反射法測線にて余震が捉えられれば反射法による地下構造の推定に役立つと期待できる. 例えば桑原ほか (2001) は地震計アレイを用いて人工地震と余震の観測を行っているし, Nakagawa *et al.* (2005) も反射法用地震計を用いて余震観測を行った. しかし, 我々の反射法探査では観測が日中のみに限られる上, 連続的に記録している訳ではないため, 多くの余震を取り逃がす恐れがあるし, 山口 (1998) のように自然地震波は得られても直達 P 波を捉えられない可能性もある.

我々は 2005 年 9 月に宮城県北部の南郷町において反射法による地下構造探査を行った (伊藤ほか, 2006). この探査時に, 大オフセットでの人工地震観測及び自然地震観測を目的として測線脇及び測線から離れた地点での 3 成分地震計の連続観測を合わせて行った. この際, 3 成分地震計として, 広帯域地震計を選び, 反射法に普段用いている短周期計より長周期の人工震源に由来する波についても合わせて調査することとした. この探査測線近傍では 2005 年 8 月 16 日に宮城県沖で M7.2 の地震が起きた. また, この探査測線下には 2003 年 7 月 26 日の宮城県北部地震の断層があるのではないかと考えられており (横倉ほか, 2004), 短期間の観測でも近傍で起きた自然地震を捉えられると期待できた. 本稿では, この広帯域地震計による観測及び反射法測線にて得られた自然地震波形について報告する.

### 2. 観測

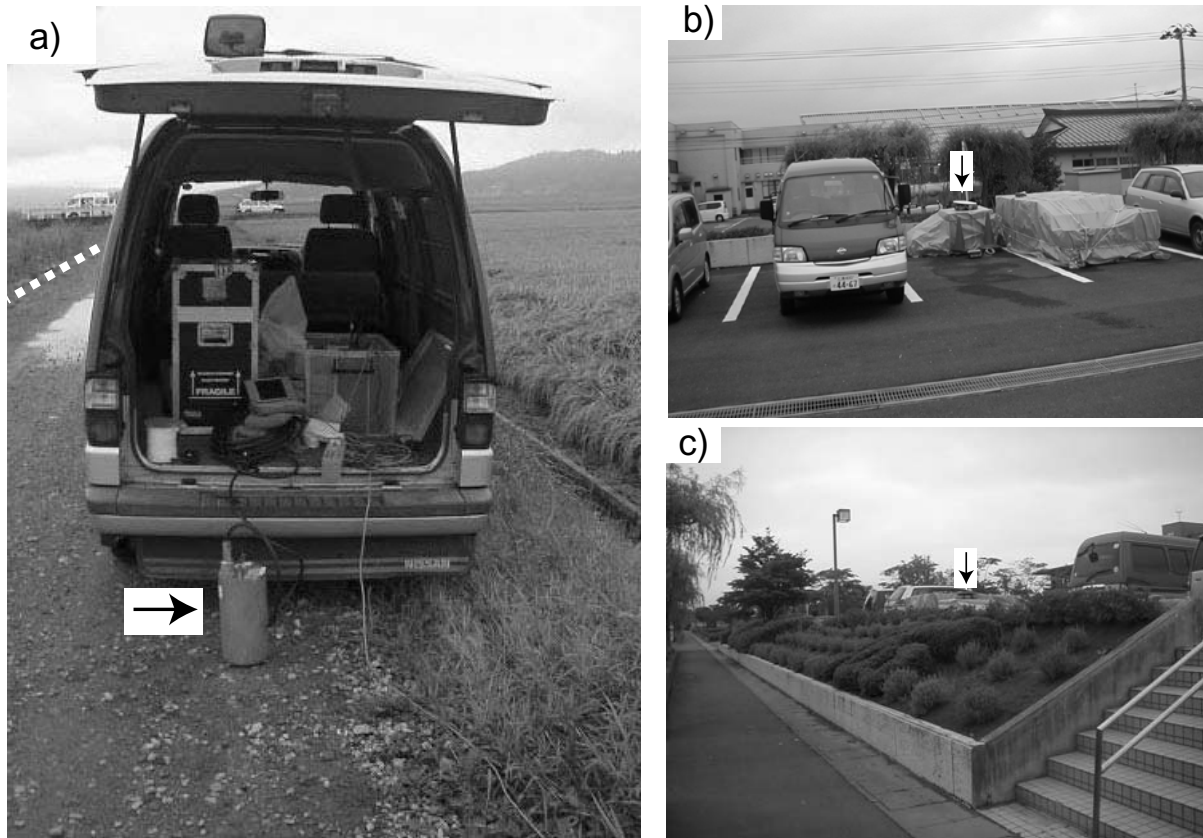
2005 年 9 月 4 日から 9 日にかけて宮城県北部の南郷町 (2006 年 1 月 1 日より美里町) にて反射法地震探査を目的として, 固有周期 10 Hz の上下動地震計 (以下, 反射法用地震計と略す) を 10 m おきにほぼ東西南北 2 km ずつの十字型に設置した (図 1) (伊藤ほか, 2006). 人工震源として大型パイプリータ 2 台を用い, スイープ周



第 1 図 a) 探査は宮城県北部で行われた. b) 探査の詳細図. 反射法用短周期上下動地震計の測線 (実線), 広帯域地震計 (黒三角印) の設置位置及び図 7, 8 で波形を示す自然地震の震源 (2005/09/05 15:21:29.17 ± 0.08s 38.461° N ± 0.004° 141.149° E ± 0.004° 13.3 km ± 1.4 km 0.6 M JMA, 星印). 人工震源は南北方向の測線上で発震した. 広帯域地震計が地点 A にあった際の発震位置は南北方向の測線の南端付近である.

Fig. 1 a) The survey was executed in the northern part of the Miyagi prefecture, Japan. b) The detailed map to show the reflection survey stations (solid line), the broadband stations (solid triangle) and the earthquake (2005/09/05 15:21:29.17 ± 0.08s 38.461° N ± 0.004° 141.149° E ± 0.004° 13.3 km ± 1.4 km 0.6 M JMA; solid star) whose waveforms are shown in Figures 7 and 8. The reflection source shook the ground near the southern end of the north-south reflection survey line when the broadband seismometer was settled at Site A.

<sup>1</sup>地質情報研究部門 (Institute of Geology and Geoinformation, GSJ)



第2図 a) 地点Aでの広帯域地震計の設置状況及び b),c) 地点Bでの設置状況。地点Aでは短時間の観測であったため、停車した車内にレコーダ等を置き、地震計は車の手前側に設置した。地震計を矢印で示した。道路の反対側に沿って反射法用地震計が設置されている(点線)。地点Bでは、図中央の矢印で示されたブルーシート内に地震計及びレコーダ等が設置されている。設置場所は役場の駐車場端であり、周囲には駐車車両が散見される。この駐車場は道路から2 mほど高く盛り土されている。

Fig. 2 a) The condition of the broadband station at Site A. Seismometer, which is indicated by an arrow, was set on the behind of the car shown in the figure. On the while, a recorder and other equipment were in the car. Short period geophones for the reflection survey are seen on the opposite side of the road (dashed line). b) and c) At Site B, the seismometer and other equipment were in the arrowed object covered by a sheet seen in the center of the figure. Site B is on an edge of a parking lot on a bank with an about 2 m height. Several cars were parking around the seismometer.

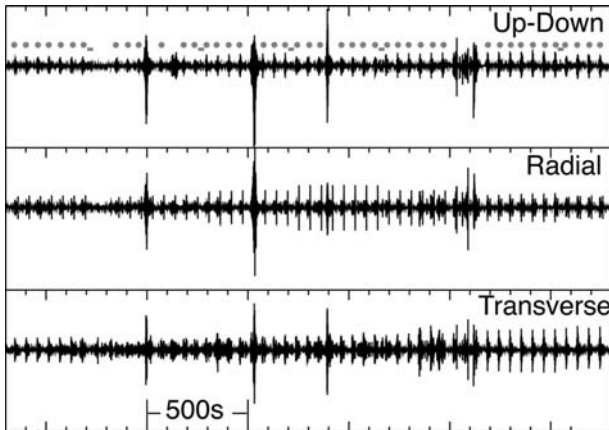
波数は8~50 Hz、スイープ長25 sとし1箇所ですべて8回発震した。1発震ごとに40秒間収録し、観測波形とスイープ波形との相関はとらずに記録した。各発震間の収録していない時間は15秒ほどである。

この測線とは別に、地震計1台を反射法の測線傍(地点A)及び測線から2 km程度離れた場所(地点B)の2箇所に順次設置した(図1)。地点Aは観測開始時の震源位置から400 m程度離れた場所(図2a)で反射法用地震計の測線から測線直交方向に4 mほど離れており、測線上の一番近い地震計との距離は7 mほどである。地点Bは南郷町役場の駐車場内(図2b,c)であり、道路より2 mほど盛り土された場所に設置した。この観測に用いた地震計は50 Hzから360 sまで速度でフラットな感度特性を持つ3成分広帯域地震計であり、サンプリングは200 Hzである。地点Aで2005年9月4日10時~12時、地点Bで9月4日14時~10日10時の期間、連

続観測を行った。地点Aでは短時間の観測のため図に示すように地震計に覆い等をせずに設置したが、地点Bでは吉田ほか(2001)の結果に基づき、地震計に発泡スチロールの覆いをかぶせてアスファルト上に設置した。なお、広帯域地震計のGPS時計に不具合があったため、今回は広帯域地震計と反射法用地震計の波の到達時刻の差は議論しない。

### 3. 広帯域地震計にて得られた人工地震

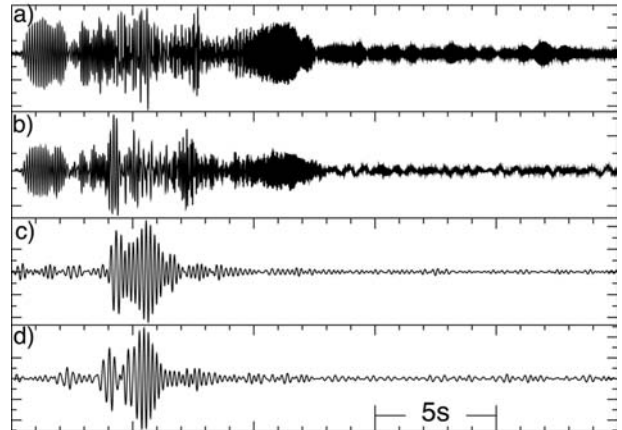
地点Aにて広帯域地震計の上下動、震源方向及び震源直交方向の水平動の3成分に明瞭な人工地震波形が得られた(図3)。図3には、同じ形状の波形が何度か続き、次に別の形状の波形が何度か続いているのが見られる。この波形の形状の違いは上下動成分より水平動成分により顕著である。この同じ形状の波形が同一地



第3図 5 Hzのハイパスフィルターをかけた地点Aでの広帯域地震計の3成分記録。周期的に繰り返す人工震源(灰色の丸)がはっきりと見える。震源車の場所の移動によるノイズを灰色の四角で示した。

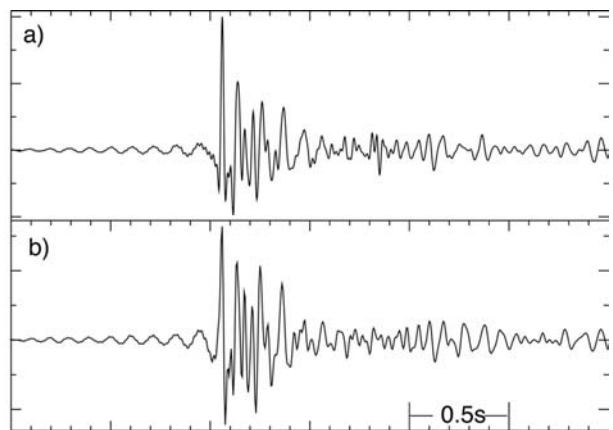
Fig. 3 Three component seismograms obtained by the broadband seismometer at Site A which is high-pass filtered with a cut-off frequency of 5 Hz. Periodic artificial earthquakes are clearly seen (gray circle). Shakes due to the movement of the vibrator (gray square) are also recorded.

点での発震に対応すると考えられる。この同一地点での発震による波形の後に、今まで発震していた場所から次の発震場所に移る際の人工震源の移動に伴うものと考えられるノイズも見られた。このノイズは主として人工地震の周波数帯より長周期であり、したがって反射法の解析にはほとんど影響しないと考えられる。この他に、波形の形状が大きく違う大振幅の波もいくつか見られるが、これは人の移動等に伴うノイズであると考えられる。図4に広帯域地震計と直近の反射法用地震計の人工地震波形を示す。波形の形状の差は、広帯域地震計と反射法用地震計の設置位置及び振幅・位相特性の差が主な原因と考えられる。例えば、広帯域地震計の上下動成分には人工震源での発生周波数及び反射法用地震計の固有周波数より長い数Hz程度の人工地震に起因する表面波の分散が反射法用地震計の波形と比べ明瞭に記録されている(図4c,d)。なお数Hzより長周期の波は今回は有意な振幅を持っていなかった。この広帯域地震計波形及び反射法用地震計波形と人工震源が発生させた波形との相関をとったものを図5に示す。二つの地震計の波形はよく似ており、S/Nにも大きな差はない。次に広帯域地震計が地点Bで観測していた際の記録から、人工震源の発震時刻に合わせて波形を切り出し、人工地震波形との相関をとった波形を図6に示す。0秒がレコーダの内部時計による発震時刻であり、図に示した時間帯では人工震源は同一地点で発震している。約1秒のところにとどの波形でも顕著なピークが見えることから、この波が人工地震の初動と考えられる。以上より、地点A及びBに設置された広帯



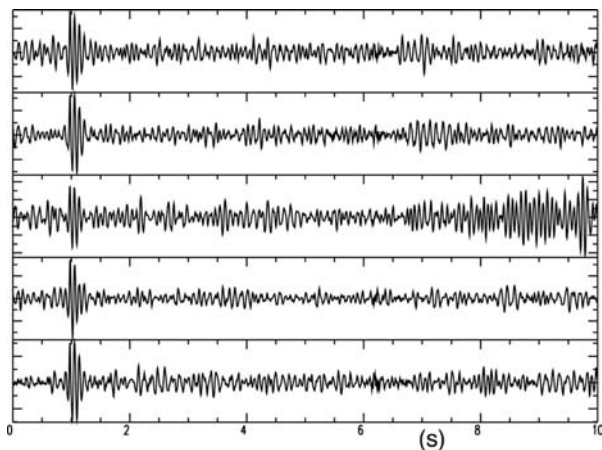
第4図 a) 一番地点Aに近い反射法用地震計の波形。地点Aから7 m程度離れている。同一地点での7回の発震を足しあわせた。b) 地点Aで広帯域地震計上下動成分にて得られた人工地震波形。a)と同じ7回の発震を足しあわせ、1 Hzのハイパスフィルターをかけた。震源は地点Aから350 mほど離れたところにある。c)とd) a)とb)の波形にそれぞれ3~6 Hzのバンドパスフィルターをかけた。

Fig. 4 a) The stacked seismogram of the nearest geophone to Site A for the 7 artificial quakes. The distance between the geophone and Site A is about 7 m. b) Stacked up-down component of the broadband seismometer observed at Site A for the same quakes as a) which is high-pass filtered at 1 Hz. The quakes shook the ground at the same place which is about 350 m apart from the seismometer. c) and d) The waveforms shown in a) and b) are band-pass filtered at frequencies between 3 and 6 Hz, respectively.



第5図 a) 図4で示した反射法用地震計波形及びb)広帯域地震計波形に人工震源波形の相関をとった波形。

Fig. 5 Seismograms correlated between the synthetic seismograms of the vibrator and the same waveforms shown in Figure 4 observed by a) the broadband seismometer at Site A and b) the geophone.



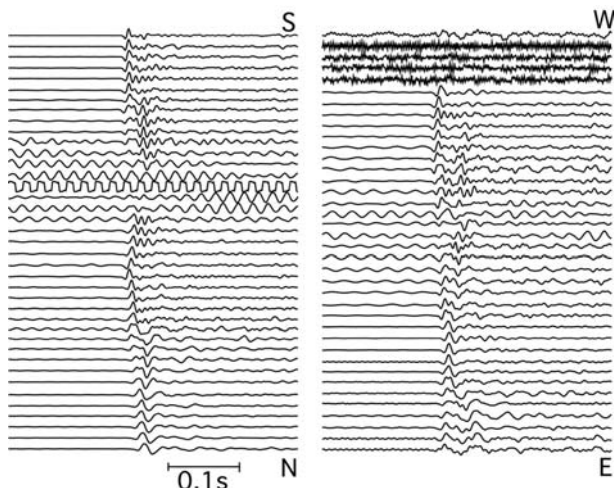
第6図 地点Bでの広帯域地震計の震源の発震波形との相関をとった後の波形. 震源は同一点で発震した.

Fig. 6 Seismograms of the broadband seismometer at Site B correlated with the synthetic seismograms of the vibrator. The quakes shook the ground at the same place.

域地震計にて反射法用の人工震源波形が取れたことを確認できた. そのS/Nは反射法用の地震計と同程度であると考えられる.

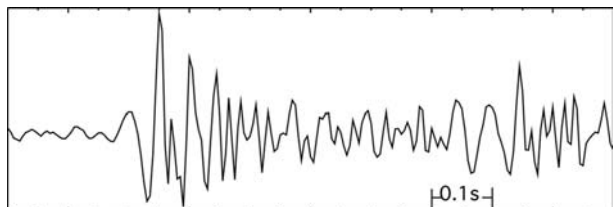
#### 4. 反射法用測線にて観測された自然地震

反射法探査中にほぼ測線下の自然地震 (図1) を含むいくつかの自然地震が反射法測線にて観測された. これら全ての自然地震は広帯域地震計が地点Bにて観測している時期に起こった. このうちで測線下の地震は宮城県北部地震の余震と考えられるが, その震央は反射法測線から1.3~2.8 kmしか離れておらず, 深さ13 kmと深い. この地震の良好なP波初動記録が人工震源近く以外の反射法測線のほぼ全体にわたり得られた (図7). 初動の到着時刻の観測点間の差は0.1秒程度であり, 波がほぼ鉛直方向からきたことを示している. この地震の発生時刻と測線でのP波到着時の時間差は4.3秒であり, 震源決定精度の問題は残るが測線から測線下の震源断層までの往復走時が8.6秒程度であることを示唆する. 初動の到着時刻には距離依存の他に相対的なゆらぎが観測されている. 直達P波の0.05秒程度後ろまで後続波も確認できる. この後続波は, 震源から見た測線の見込み角が小さいことから震源あるいはその近傍起源の波とは考えづらく, 観測点下のごく浅い不均質構造の影響による可能性が高い. 広帯域地震計でもこの地震の波形が得られているが, 反射法測線での波形と比べ後続波の振幅が大きくなり, それほど明瞭な立ち上がりは得られなかった (図8).



第7図 2003年宮城県北部地震の余震波形. 震央は図1に示してある. 左図上が南北測線の南端, 下が北端. 右図上が東西測線の西端, 下が東端. 左図上から15番目の観測点の傍で人工震源が発震していた. 観測点間隔は約50 m.

Fig. 7 The waveforms for an aftershock of the 2003 Miyagi-ken Hokubu earthquake whose epicenter is shown in Figure 1. The southern station (up) to the northern one (down) on the left chart and the western (up) to the eastern (down) on the right chart. The distances between the stations are about 50 m.



第8図 第7図に示した地震の地点Bでの広帯域地震計上下動成分の15 Hzのハイパスフィルターをかけた波形.

Fig. 8 The 15 Hz high-pass filtered up-down component waveform for the same event as Figure 7 observed by the broadband seismometer at Site B.

#### 5. 結論

広帯域地震計にて測線脇の観測時に良好な人工地震波形を得ることができた. またより遠方の地点Bでの観測でも初動と考えられる波形が得られた. 以上より広帯域地震計を反射法の補完用途に充分使用できると考えられる. 今後, 長周期の波を狙った観測を人工地震探査と同時にを行う際に, 広帯域地震計を使用することは選択肢の一つとなろう.

余震域で反射法地震探査を行う際, 反射法に用いている短周期地震計でも良好な自然地震波形記録が得ら

れることが確認できた。余震域での反射法探査時には、今回の観測のように人工地震波との相関を取る前のデータを記録し、自然地震波の解析の余地を残すことも考慮すべきであろう。また、1観測点の記録でも震源断層の位置をある範囲に拘束することは可能であり、反射法探査の結果の考察に寄与すると考えられる。地震を捉える確率を上げるためには反射法測線近くで1点でも連続収録を行い、夜間も収録を続けることが望ましい。今回得られた反射法測線下の余震の波形からはこの余震のより精度の高い震源位置が得られ、反射法で得られた断層面と震源断層との関連等の情報が得られると期待できる。

**謝辞：**宮城県南郷町役場（当時、現宮城県美里町南郷総合支所）及び地質情報研究部門の長 郁夫氏には観測に御協力いただきました。図に示した地震の震源は国土地理院、北海道大学、弘前大学、東北大学、東京大学、名古屋大学、京都大学、高知大学、九州大学、鹿児島大学、独立行政法人防災科学技術研究所、独立行政法人海洋研究開発機構、独立行政法人産業技術総合研究所、東京都、静岡県、神奈川県温泉地学研究所、横浜市及び気象庁から提供を受けたデータを気象庁・文部科学省が協力してデータを処理した結果を使用しました。図の作成にはGMT (Wessel and Smith, 1998) を用いました。編集委員の松本則夫氏及び査読者の今西和俊氏には的確なコメントをいただきました。ここに記して深く感謝します。

## 文 献

伊藤 忍・横倉隆伸・山口和雄・加野直巳・大滝壽樹  
(2006) 2003年宮城県北部地震震源域北部における

反射法深部地下構造調査, 地球惑星科学関連学会  
2006年合同大会予稿集.

桑原保人・今西和俊・伊藤久男 (2001) 2000年鳥取県西部地震 (M7.3) の地震断層のトラップ波観測, 地球惑星科学関連学会合同大会予稿集 (CD-ROM), S3-016.

Nakagawa, S., N. Hirata and H. Sato (2005) Imaging of the crust using aftershocks of the 2000 western Tottori prefecture earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 32, No. 10, L10310, doi:10.1029/2004GL022332.

Wessel, P., and W.H.F. Smith (1998) New, improved version of the Generic Mapping Tools released, *EOS Trans. AGU*, 79, 579.

山口和雄 (1998) 地震探査測定時に捉えられた自然地震, 地質調査所月報, **49**, 195-200.

山口和雄・加野直巳・横倉隆伸・木口 努・横田俊之・田中明子・佐藤比呂志 (2000) 深谷断層周辺における反射法地震探査—江南台地と妻沼低地の地下構造—, 地震 第2輯, **53**, 115-125.

横倉隆伸・山口和雄・加野直巳・横田俊之・田中明子・大滝壽樹 (2004) 2003年宮城県北部地震震源域南部における反射法地下構造探査 (その1) : 大型バインプレート探査結果, 地球惑星科学関連学会2004年合同大会予稿集, S053-017.

吉田康宏・神定健二・原田智史・藤原健治・大滝壽樹・田中明子・金嶋 聡・末次大輔・神谷眞一郎・石原 靖・竹中博士・斉田智治・藤井雄士郎 (2001) 広帯域地震計設置のための埋設法の比較観測, 地震 第2輯, **54**, 9-16.

(受付：2005年12月13日；受理：2006年3月2日)