

ケーブル式海底地震計の姿勢と強震動

平田 賢治^{*1} 川口 勝義^{*1}

釧路十勝沖海底地震総合観測システムの3台のケーブル式海底地震計は、2000年1月28日の根室半島沖地震 ($M_J 7.0$) によって発生した、最大約 $150 \text{ cm/s}^2 \sim 230 \text{ cm/s}^2$ (約 $0.15 \text{ G} \sim 0.23 \text{ G}$; 1G は重力加速度) の強震動によっても、その姿勢をわずか $0.005 \sim 0.05$ 度しか変えなかった。想像以上に、ケーブル式海底地震計の円筒容器の姿勢は変わらないようである。

キーワード: 海底地震計, 姿勢, 釧路沖, 強震動

Attitude of cabled ocean-bottom seismometers and strong ground motion on the seafloor

Kenji HIRATA^{*2} Katsuyoshi KAWAGUCHI^{*2}

Attitude of three ocean-bottom seismometers in a cabled seafloor observatory southeast of Hokkaido, Japan, was changed only $0.005 \sim 0.05$ degree by strong ground motion, with maximum acceleration of approximately $150 \text{ cm/s}^2 \sim 230 \text{ cm/s}^2$ (approximately $0.15 \text{ G} \sim 0.23 \text{ G}$; 1G is the gravitational acceleration), from the January 28, 2000 Nemuro-Hanto-Oki earthquake ($M_J 7.0$ where M_J is the magnitude scale of the Japan Meteorological Agency.). Contrary to our expectations, it seems that attitude of cabled ocean-bottom seismometers on the seafloor is very stable.

Keywords : Ocean-bottom seismometers, Attitude, off Kushiro, southeast of Hokkaido, strong ground motion

* 1 海洋科学技術センター深海研究部

* 2 Deep Sea Research Department, JAMSTEC

1. はじめに

釧路沖の海底ケーブル式リアルタイム地震観測システムには3台の海底地震計OBS1, OBS2, OBS3が装備されている(図1)。この海底地震計は、全長約169.5 cm, 最大外径約26.5 cmのベリリウム銅合金製の円筒型耐圧シリンダに収められている(図2)。円筒型耐圧容器が採用されたのは、ケーブル敷設船が航行しながら海底地震計を海中へ繰り出すことができるからである。同種の海底ケーブル式リアルタイム地震観測システムは、1979年に気象庁が東海沖に設置して以来、釧路沖で合計7基目である。いずれの観測システムも海底地震計は円筒容器に収納されている。

陸上地震観測点の場合、地震計を地面に固定するための様々な工夫ができる。例えば、強震計などは通常、観測台の上にボルトなどで固定され、強い振動が来ても地震計は地面に固定されたままである。それに比べて、そのまま海底面に設置するだけのケーブル式海底地震計は、強い振動が来れば簡単に傾いてしまうだろうと暗黙の内に考えられていた。実際に、気象庁の2つのケーブル式地震観測システムの地震計には0.1度以内の起立再現性を有したジンバルが搭載され(気象研究所地震火山研究部, 1980)、しばしば傾きを補正してきたらしい。しかし、残念なことに文献としては残っていないようである。一方、釧路沖の海底地震計にはサーボ型加速度センサが直交3方向に取り付けられている(Hirata et al., 2002; 図2)。このため地震計が傾いた場合でも、3つの加速度センサのDCオフセット出力から重力加速度

方向、すなわち地震計がどのくらい傾いたか、を知ることができる。

本報告では2000年1月28日23時21分日本時間に北海道根室半島沖で発生した $M_J7.0$ (M_J は気象庁のマグニチュードスケール)の地震(図1)の波形記録(図3)を解析し、実際にケーブル式海底地震計がどのくらい傾いたのかを調べた。この地震は釧路沖ケーブル式地震観測システムが設置された1999年7月末以降の1年間で、近くで発生した最も大きな地震であった。図3によれば、最大片振幅値にして、OBS1で約0.15 G, OBS2で約0.23 G, OBS3で約0.15 G($1G=9.8 \text{ m/s}^2$)を記録している。また、この地震によって釧路市、根室市、中標津町などで震度4を記録しており地震動は比較的大きかったが、予想に反し、「ケーブル式海底地震計はわずかな角度しか傾かなかった」という興味深い結果が得られた。

2. 非線形フィルタリングによるDCオフセット成分の抽出

地震動によって地震計が傾くと、ステップ的にDCオフセット成分が変化することが予想される。通常の再帰型(線形)ローパス・フィルターを用いてもDCオフセットのステップ的变化を検出し難い。インパルス性雑音除去とステップ的变化の保存を同時に成し遂げるフィルターの1つに非線形メジアン・フィルターがある(Brock, 1986)。今、 $\{X_{i-1}, X_i, X_{i+1}\}$ を1次のメジアン・フィルター($N=1$; フィルター長 $L=2N+1=3$)に入力すると、フィルター出力は、

$$Y_i = \text{median} \{X_{i-1}, X_i, X_{i+1}\}$$

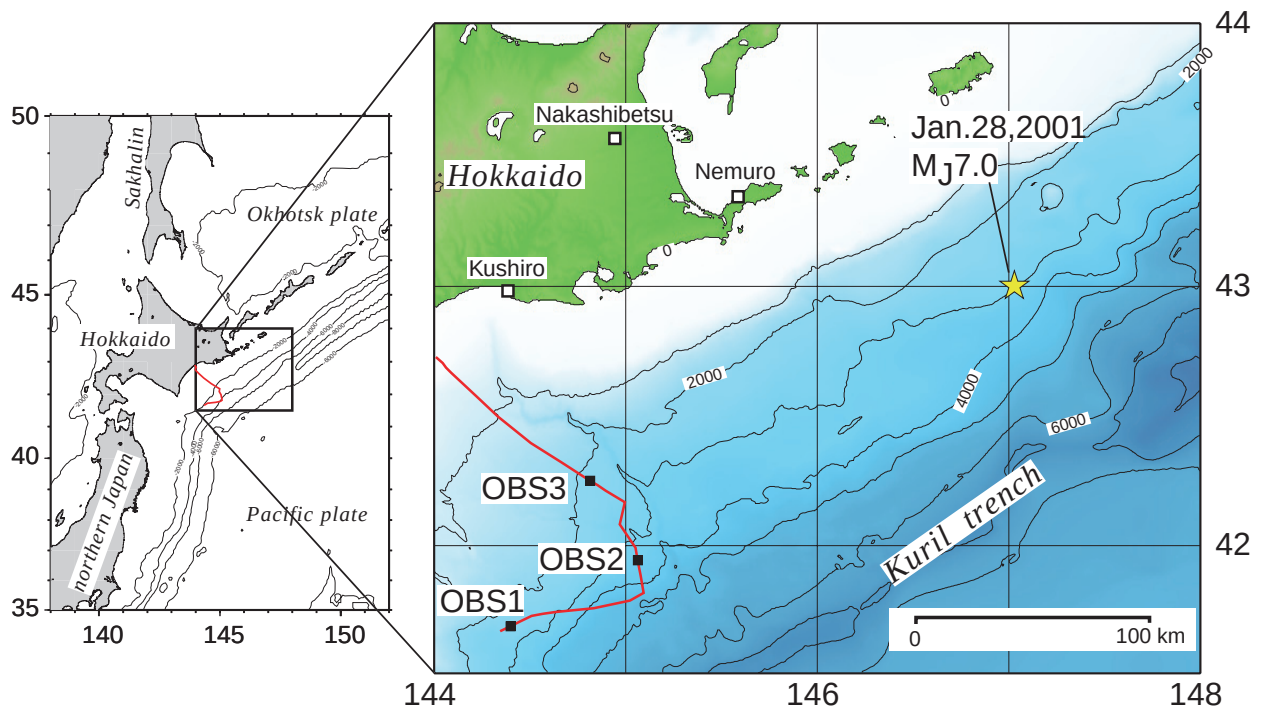


図1 2000年1月28日根室半島沖地震($M_J7.0$)の震央と釧路沖ケーブル式海底地震計(OBS1, OBS2, OBS3)の位置。

Figure 1 Location map of the January 28, 2000 Nemuro-Hanto-Oki earthquake ($M_J7.0$) and three ocean-bottom seismometers, OBS1, OBS2, and OBS3, in the JAMSTEC's cabled observatory southeast of Hokkaido, Japan.

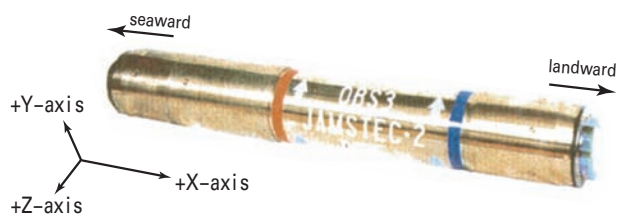


図2 釧路沖ケーブル式海底地震計

Figure 2 An ocean-bottom seismometer in the cabled observatory.

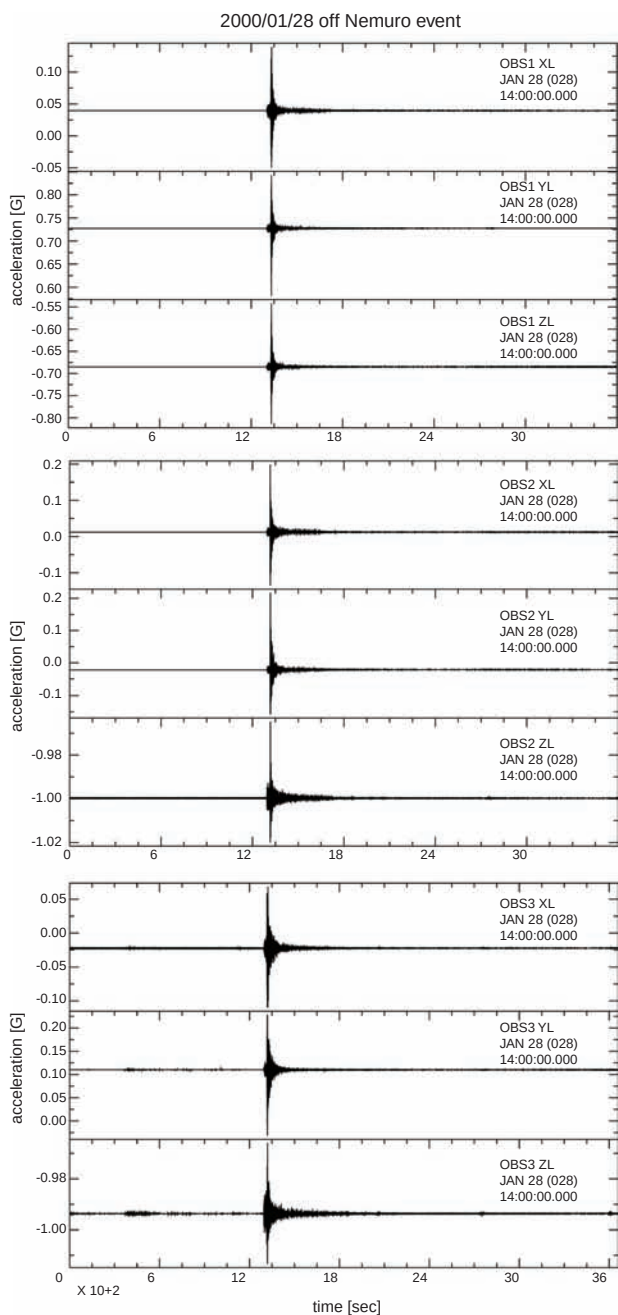


図3 釧路沖ケーブル式海底地震計による根室半島沖地震の加速度記録。2000年1月28日23時0分(日本時間)から1時間分を表示。

Figure 3 Acceleration seismograms recorded with the three ocean-bottom seismometers from the Nemuro-Hanto-Oki earthquake. One-hour records from January 28, 2000, 14:00 UT are plotted.

となる。ここで、 $\text{median}\{b_1, b_2, \dots, b_{2N+1}\}$ は $\{b_1, b_2, \dots, b_{2N+1}\}$ の中央値を意味する。また、 $\{X_{i-2}, X_{i-1}, X_i, X_{i+1}, X_{i+2}\}$ を2次のメジアン・フィルター($N=2$; フィルター長 $L=2N+1=5$)に入力すると、フィルター出力は

$$Y_i = \text{median}\{X_{i-2}, X_{i-1}, X_i, X_{i+1}, X_{i+2}\}$$

となる。このフィルターは、 $N=(L-1)/2$ 個もしくはそれ以内のデータ点で構成されたスパイク的なノイズを除去する。メジアン・フィルターはもともと画像処理等の分野(Kundu et al., 1984)で多用され始めたが、最近では気象学や海洋学の分野(Hanawa et al., 1995)や地殻変動の検出(花輪・小橋, 1999)でもスパイク的なノイズを除去するために使用されるようになってきた。地震波は、プラスのスパイクノイズとマイナスのスパイクノイズが交互につながって構成されていると考えても良いので、ここではメジアン・フィルターを使用する。

図4に根室半島沖地震のOBS1のX, Y, Z各成分のパワースペクトル密度を示す。約0.04 Hz以上の高周波帯域に地震動エネルギーが見られる。OBS2とOBS3では各々0.05 Hzと0.03 Hz以上に地震動エネルギーが見られた。ここでは、DCオフセットの変化を抽出し海底地震計の傾きを調べるため、一律0.03 Hz以上の高周波成分を除去することを考える。計算の省力化のため、サンプリング間隔0.01秒の地震データを1秒間隔へダウンサンプルし、これにフィルター長67秒($N=33$; $L=67$ に相当; 33秒以下の幅を持つスパイク的なノイズを除去する)のメジアン・フィルターをかけた。その結果を図5に示す。3台のケーブル式海底地震計のすべてでとても小さいが、ステップ関数的なDCオフセット成分の変動が抽出されていることがわかる。

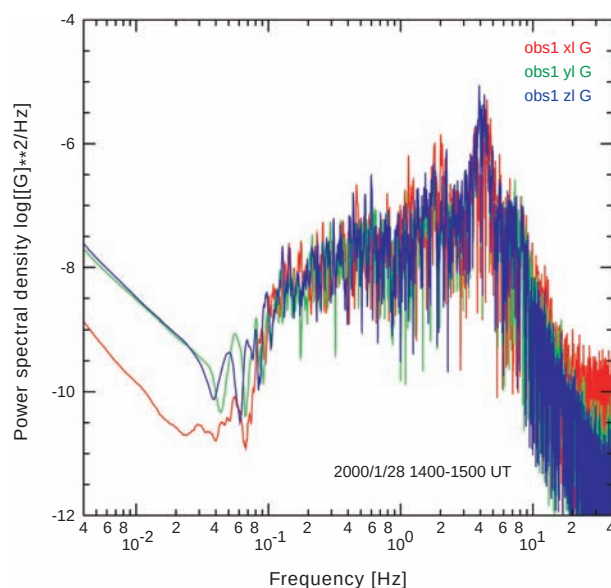


図4 OBS1での根室半島沖地震による加速度パワースペクトル。

Figure 4 Power spectral density plot of acceleration seismogram, recorded with OBS1, due to the Nemuro-Hanto-Oki earthquake.

3. 地震動によるケーブル式海底地震計の姿勢の傾き

図5の時間スケールでは、DCオフセットのステップ的变化は3つの海底地震計でいずれも1320秒(1月23日23時22分日本時間)前後に起きているように見える。ステップ的变化の起きる前のフラットな部分(600秒-1200秒の区間)と後のフラットな部分(3000秒-3600秒の区間)のDCオフセットの平均値を求め、海底地震計の直交3軸の傾斜角を求めると表のようになる。参考のため、釧路沖に観測システムを設置した直後の1999年7月31日と2000年3月6日時点での海底地震計3成分の傾斜角も表に示した。海底地震計のAD変換の有効桁数から判断すると、0.001度の桁の傾斜角変化は十分有意である。方位角は実際に測定したものではなく、海流の影響、船速、海底地形の影響をリアルタイムで計算するケーブル敷設支援システムによって観測システムの設置時に推定された値であり、数度以内の精度で決定されていると考えられる(Hirata et al., 2002)。また、ケーブル式海底地震計には方位計はついていないので、海底地震計(円筒容器)の水平方向の動きは分からない。

図6に、生の加速度記録とメジアン・フィルター処理後の記録の1320秒付近の120秒間を拡大して示した。3台の海底地震計のほとんどの成分で、DCオフセットが変化し始める時刻がS波の到着時刻とほぼ一致することがわかる。

結局、根室半島沖地震による海底地震計の3軸の傾斜角の変化は、概略0.005~0.01度であったことがわかる(表)。最も大きく傾斜角が変化したのはOBS2のY軸であったが、その傾斜角変化はわずか0.05度ほどであった。3台の海底地震計各々の3軸方向の変化を概念的に示すと図7のようになる。

この程度の大きさの傾斜角の変化は、1999年7月31日と2000年3月6日の時点の傾斜角差に比べ小さい。数ヶ月間にわたる傾斜角の変化は、海底地震計(円筒容器)が傾いたか、あるいは加速度センサ出力が(海底地震計の姿勢は変化せず)DCドリフトを起こしたためと考えられる。釧路沖ケーブル式地震計に搭載されたサーボ型加速度センサとほぼ同型機種は、陸上観測坑内における10日間の試験観測において、水平成分にして 1×10^{-5} GのDCドリフトを示したという報告がある(片尾ほか, 1990)。傾斜角変化にして約0.0005度/10日であるが、この値は表に示した約7ヶ月間のDCオフセット差に比べ概して小さい。海底地震計(円筒容器)が数ヶ月の間に、地震計のまわりの未固結堆積物の圧密や地震動のためにわずかに(100分の1度のオーダー)動いたのであろう。

4. 議論とまとめ

2000年1月28日の根室半島沖地震($M_j 7.0$)の際に、釧路沖ケーブル式地震観測システムの海底地震計OBS1、OBS2、OBS3は、それぞれ約0.15 G(約147 cm/s^2)、約0.23 G(約225 cm/s^2)、約0.15 G(約147 cm/s^2)の最大加速度の地震動を観測した。例えば、1923年関東大地震($M 7.9$)によって、地震断層端直上に位置していた東京・山の手の地盤で、有効最大加速度が約300~400 cm/s^2 であった(大崎, 1981)ことと比べると、陸上と海底で環境は異なるが、2000年1月28日根室半島沖地震による地震動は比較的強い「強震動」の範疇に入ると考えられる。ケーブル式海底地震計は海底面にそのまま設置しているだけであるから、この程度の強震動によって海底面、したがって海底に存在する未固結堆積物が揺れたのであろう。

表 ケーブル式海底地震計加速度センサ3成分の軸の傾き

Table Dip angles of each orthogonal axis on ocean-bottom seismometers

			31-Jul-1999	28-Jan-2000		06-Mar-2000
				before event	after event	
			azimuth ¹ (°)	dip ² (°)	dip ² (°)	dip ² (°)
OBS1	+X-axis	243.82	-2.262	-2.271	-2.269	-2.266
	+Y-axis	336.21	-46.580	-46.665	-46.683	-46.691
	+Z-axis	331.68	43.330	43.244	43.227	43.219
OBS2	+X-axis	170.66	-0.647	-0.679	-0.704	-0.715
	+Y-axis	260.65	1.257	1.281	1.230	1.236
	+Z-axis	107.91	88.586	88.550	88.582	88.572
OBS3	+X-axis	122.58	1.288	1.280	1.272	1.268
	+Y-axis	212.44	-6.376	-6.334	-6.330	-6.341
	+Z-axis	223.95	83.494	83.537	83.542	83.533

*1 azimuth is measured clockwise from the north.

*2 dip is measured downward from the horizontal plane (positive=down; negative=up).

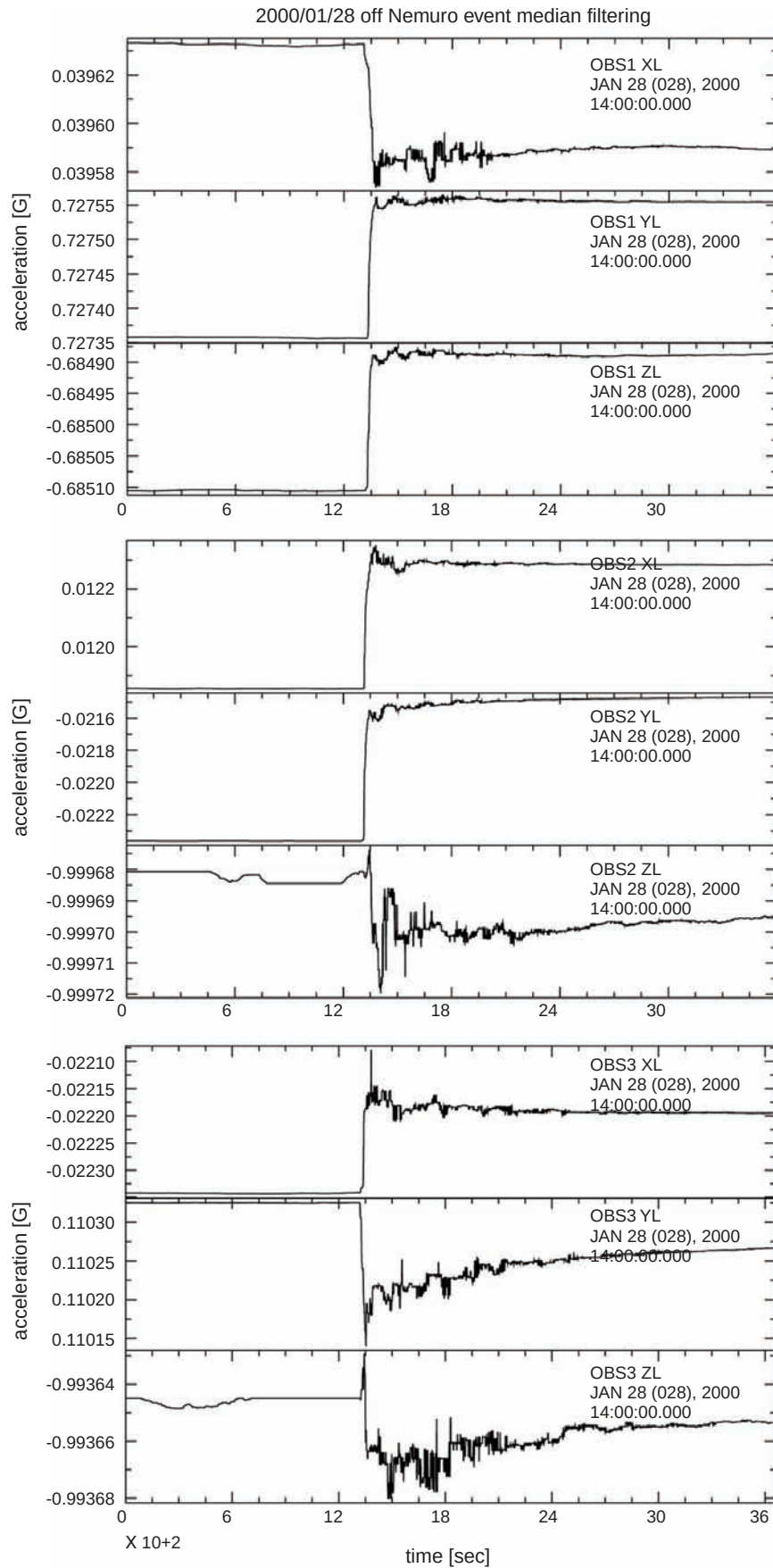


図5 根室半島沖地震の加速度記録の非線形メジアン・フィルタリング結果。1320秒付近にDCオフセットのステップ的变化が見られる。

Figure 5 Nonlinear median-filtered acceleration seismograms of the Nemuro-Hanto-Oki earthquake. Note that DC-offset steps are seen around 1320 sec.

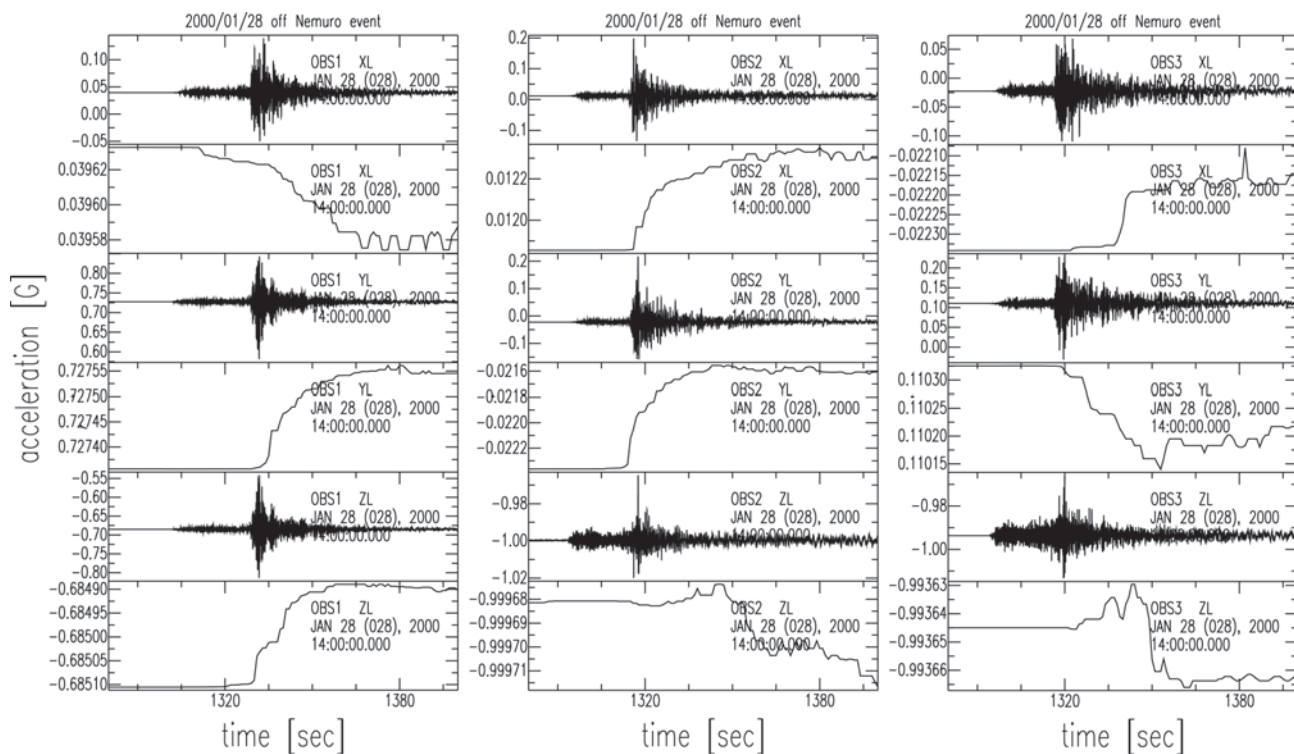


図6 根室半島沖地震の生加速度記録とメジアン・フィルター処理によって得られたDCオフセット変化。DCオフセットが変化し始める時刻はS波の到着時刻にほぼ一致する。

Figure 6 Comparison between original seismograms and nonlinear median-filtered ones. Most of DC offset steps seem to coincide with S-wave arrivals.

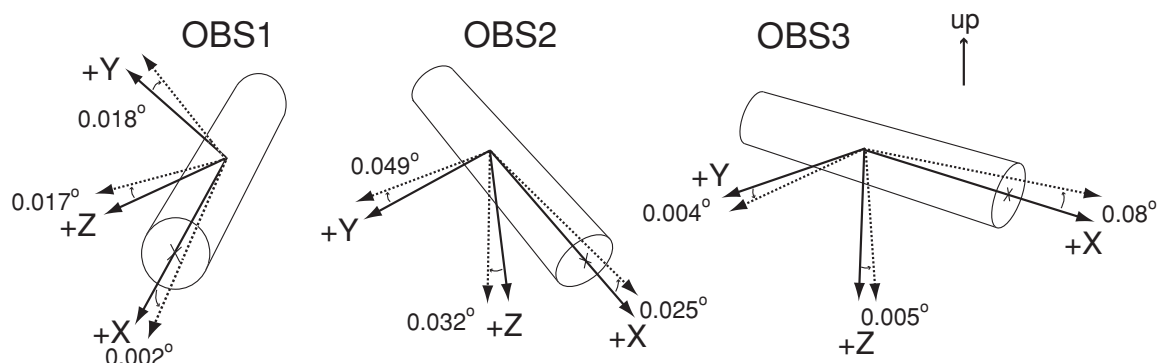


図7 根室半島沖地震によって変化した釧路沖海底地震計の姿勢

Figure 7 Inclination changes of ocean-bottom seismometers in the cabled observatory due to the Nemuro-Hanto-Okai earthquake.

れば、海底地震計(円筒容器)の姿勢が海底面に対して傾いてしまうことが予想された。

しかし実際に地震記録を解析してみたところ、各地震計の直交3軸の傾斜角が平均してわずかに0.005~0.01度程度変化しただけであった。最大でも0.05度程度の傾斜角変化しか見られなかった。直交3軸の水平方向の動きもおそらく同等程度であると想像される。

表によれば、3台の海底地震計の+X軸(円筒容器の長軸)は水平から2.3度以内の傾斜角を示し、3台の海底地震計(円筒容器)はほぼ水平に設置されていることがわかる。図8

は2001年7月29日の「かいこう」第199潜航で撮影された、OBS3の実際の設置状況を示す。釧路沖ケーブル式観測システムの設置後約2年ほど経過した時点の写真だが、円筒容器が細粒の砂質泥底中に3分の1から半分程度はほぼ水平に埋没している。設置後2年間に降り注いだ沈降粒子によっても埋没量は増加しているものと思われるが、釧路沖のケーブル式海底地震計の水中重量は約200kgある(円筒容器含む)ので、設置の瞬間にも海底未固結堆積物にある程度埋没したと想像される。砂質泥のような未固結堆積物に、その下部を埋没させた円筒型の海底地震計の姿勢は、

未固結堆積物の粒子と円筒容器の間の摩擦などによって、ある程度しっかりと海底地盤に対して固定されるようである。

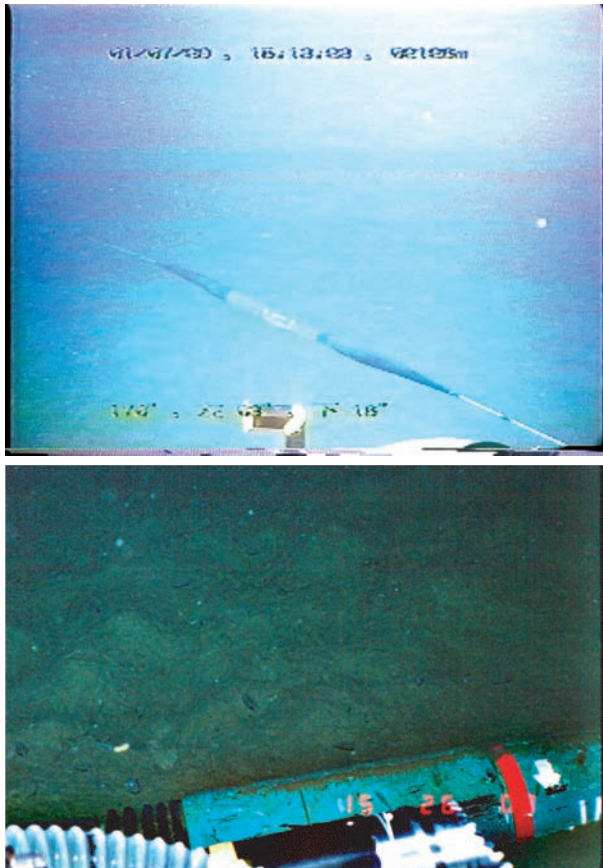


図8 OBS3の実際の設置状況(設置から約2年後)。(上)遠景(下)近景。海底地震計の円筒容器は海底地震計を封入した円筒容器はその下部1/3から半分ほど砂質泥中に埋没している。また、円筒容器は設置前には明るい銅色(図2)であったが、青銅色に変色している。

Figure 8 OBS3 on the seafloor about two years after the installation. (upper) distant view (lower) closed view. The ocean-bottom seismometer sunk from one-third to half of the diameter of the seismometer's cylinder into the unconsolidated sediment, mainly consisting of sandy mud.

謝辞

「かいこう」第199潜航による海底地震計の設置状況確認等では、平田和好潜航長をはじめとする「かいこう」運航チーム及び、請蔵栄考船長をはじめとする「かいいい」乗組員の皆様にお世話になった。一部の図は、SAC (<http://www.llnl.gov/sac/>) 及びGMT (Wessel and Smith, 1995, *EOS Trans. AGU*, 76, 329) を用いた。

参考文献

- 1) Brock, F.V. (1986): A non-linear filter to remove impulse noise from meteorological data, *J. Atmos. Oceanic Tech.*, 3, 51-58.
- 2) 花輪公雄, 小橋史明 (1999): 沿岸潮位資料による1978年宮城県沖地震の余効的地殻変動の検出, *海の研究*, 8, 339-347.
- 3) Hanawa, K., P. Rual, R. Bailey, A. Sy, and M. Szabados (1995): A new time-dependent equation for Sippican or TSK T-7, T-6 and T-4 expendable bathythermographs (XBT), *Deep-Sea Res.*, 42, 1432-1451.
- 4) Hirata, K., M. Aoyagi, H. Mikada, K. Kawaguchi, Y. Kaiho, R. Iwase, S. Morita, I. Fujisawa, H. Sugioka, K. Mitsuzawa, K. Suyehiro and H. Kinoshita (2002): Real-time geophysical measurements on the deep seafloor using submarine cable in the southern Kurile subduction zone, *IEEE J. Ocean Engineering*, 27, 170-181.
- 5) 片尾浩, 笠原順三, 是沢定之 (1990): 航空機用加速時計による地震観測—加速度計を高感度長周期海底地震観測に用いる可能性の検討—, *東京大学地震研究所彙報*, 65, 633-648.
- 6) 気象庁地震火山研究部 (1980): 海底地震常時観測システムの開発, *気象研究所技術報告*, 第4号, 1-233.
- 7) Kundu, A., S.K. Mitra, and P.P. Vaidyanathan (1984): Application of two-dimensional generalized mean filtering for removal of impulse noise from images, *IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Proc.*, ASSP-32, 600-609.
- 8) 大崎順彦 (1981): 実務家のための建築物の耐震設計法, コロナ社.

(原稿受理: 平成14年9月4日)

