

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 13 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2014

課題番号：23540489

研究課題名(和文)最新海底地震観測技術による傾斜変動観測への挑戦

研究課題名(英文)New tilt observation at the seafloor based on the latest ocean bottom seismometer technology

研究代表者

塩原 肇 (SHIOBARA, Hajime)

東京大学・地震研究所・教授

研究者番号：60211950

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：地震発生場を理解する上で、海底測地観測は今後重要な役割をもつ。2010年の陸上試験観測以降、海底面での地震・傾斜変動観測を可能とするBBOBST-NXを開発し試験を進めた。2013年4月から1年間、スロースリップイベント(SSE)が発生している房総半島沖で実用試験観測を実施した。2014年1月にほぼ直下でSSEが発生し、同年4月に機器を回収し解析を進めた。その結果、SSEに伴うと考えられる傾斜変動を捉えることが出来、5マイクロrad以上であれば現状の本機器で検出可能である。SSE発生領域直上のように大きな変動が予想される場合、海底面での傾斜変動観測の有効性は検証されたと考えられる。

研究成果の概要(英文)：Geodetic observations at the seafloor will play important role to understand the stage of earthquake occurring. We have performed the development and several tests of the BBOBST-NX, which enables the broadband seismic and tilt observation at the seafloor, after the land test in 2010. The practical long-term test observation off Boso Peninsula, where slow slip events (SSE) recurred, had been started in April 2013. In January 2014, the SSE occurred, and we recovered the BBOBST-NX in April 2014. After the analysis, a large tilt signal (5~ micro rad) near the period of the SSE was recognized. Although the maximum velocity of the bottom current at this site was 35 cm/s, we could observe this tilt signal clearly. So that, effectiveness of the tilt observation at the seafloor by the BBOBST-NX is proved well. We will continue more detailed test observations of two-years-long period at two different sites in 2015 for evaluation of annual change in the tilt data.

研究分野：海底地震学

キーワード：海底地殻変動観測 傾斜変動観測 広帯域地震計 広帯域海底地震計 BBOBS-NX BBOBST-NX スロースリップイベント 底層流

### 1. 研究開始当初の背景

研究代表者はここ 10 年ほどの間に、広帯域海底地震計(BBOBS)、そしてその改良型である BBOBS-NX を開発し実用的観測に供することで、海底広帯域地震学と言える研究分野を創り出してきた。それにより、海域でも広帯域地震のデータ解析が可能であることを実証し、その研究成果を得られるようになった(金沢・他, 2009)。これらの観測機器では普通の地震波を観測し解析するのに足る周波数帯域(360s~50Hz)をターゲットとし、陸上地震観測点並のデータが得られるようになってきたが、より長周期の帯域での観測、すなわち測地学的帯域(例えば 10000s 以上)については、海底での観測は世界的にも未踏域となっている。唯一、音響測距~GPS リンク(GPS/A)による海底での水平変動の検出は成功しつつあるが(例えば、藤本, 地震 2, 2009)、時間的に充分連続なデータを得ることは原理的に困難である。精密な海底圧力計による上下変動の検出も最近試みられているが、海面の変動や圧力計自体のドリフトの影響を効果的に取り除くのが難しいことが報告されている。海半球ネットワーク計画(1996~2001)において、三陸沖の海底掘削孔内に傾斜計を設置する試みはあったが(Shinohara et al., 2006)、この方式では面的な観測を実現することは絶望的である。

ところで、最初に挙げた広帯域海底地震計 BBOBS、BBOBS-NX で使用している広帯域地震センサー(CMG-3T、英国 Guralp 社)には、通常の地震観測で使用する速度信号出力に加えて、多くの場合に使われていないマスポジション出力というものが存在し、加速度信号を得ることが出来る。すなわち、センサーの起動時に水平動成分の振り子を中点に調整した後には、センサーの傾斜が発生するとそれに応じた上下(重力加速度)成分が出力されることになる。よって、この観測データから傾斜変動を知ることが原理的に期待される。但し、センサー部が海底面より上に存在すると、底層流の影響による機器の傾斜が発生しうするため、自己浮上型の BBOBS のような構造ではこの観測は基本的に無理である。しかし、センサー一部を海底堆積物へ突入さ

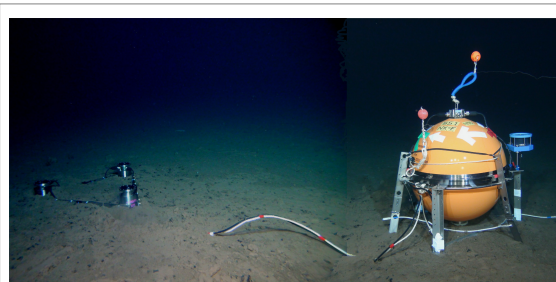


図 1. 観測中の BBOBS-NX

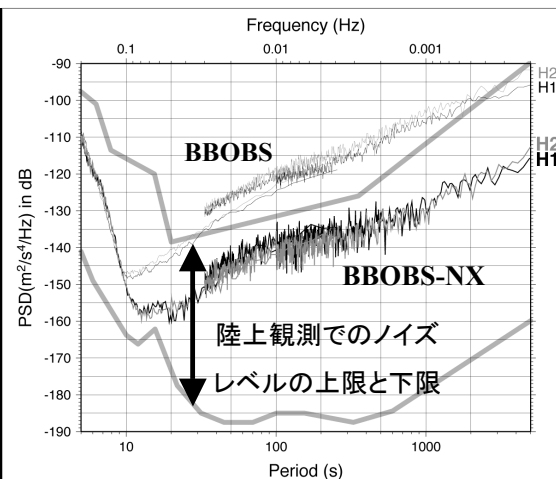


図 2. フィリピン海での試験観測で得た水平動成分ノイズレベル(H1 と H2)の低減を示すグラフ。細線が通常の BBOBS、太線が BBOBS-NX のノイズスペクトルで、背景の太い線 2 本の範囲内であれば、統計的に陸上観測点と同等のレベルであることを示す。このように、BBOBS-NX では、水平動成分よりもノイズが低い上下動成分(表示は省略)を含め、陸上観測点と同等なノイズ環境が確保可能となり、数 100 秒以上の長周期帯域でも静かであることが分かる。

せることで良好なカップリングを実現した BBOBS-NX(図 1)であれば、このような影響が無く、堆積物中とはいえ安定した傾斜変動観測を実現できると思われる。図 2 に示すように、BBOBS-NX は数 100 秒以上の長周期でも陸上観測点並みのノイズレベルが得られており、底層流の影響を殆ど受けていないことが実証されている。また、過去に多数実施してきた BBOBS による 1 年以上の長期観測で、マスポジション出力の値はセンサーの起動から数ヶ月後になると安定した値を示していることが分かっている。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、これまでに実用化されていない海底での傾斜変動観測を、学術的成果が得られるよう面的に実現可能とさせる基礎技術の開発にある。既に開発の第一段階を完了させた最新の次世代型広帯域海底地震計(BBOBS-NX)をその開発での基盤技術とし、実証的試験観測を本研究で行うことにより、その観測手法の妥当性を検証し、実用化の道を見出すことを狙う。最終的には、海洋プレートの沈み込みでのスロースリップに伴う島弧側プレートの変形過程を傾斜変動として検出することが、面的な海底傾斜変動観測における一つの目的である。そのために必要な  $0.1 \mu\text{rad}$  オーダーの傾斜変動を有意に見出すことが出来る観測技術の創出が本研究での到達目標となる。

そのための試みとして、自由落下で投入、無人潜水艇で展開し設置する方式の BBOBS-NX を改造し、広帯域・高精度な地震波信号と共にマスポジション信号を同時に取得できる BBOBST-NX とする。本センサー単体での水管傾斜計との傾斜変動計測の比較試験は2010年  
に実施し、その結果を図 3 に示した。この

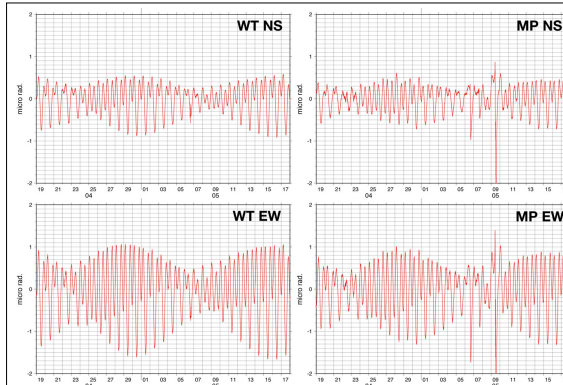


図 3. 水管傾斜計(WT、左)と BBOBST-NX センサーによる傾斜値(MP、右)の比較。ほぼ 1 ヶ月間の記録で、約 1 週間長の HPF をかけてある。縦軸の範囲は  $\pm 2 \mu\text{rad}$ 。MP で大きく乱れている箇所は、観測坑内への人の出入りに因るもので、それを除き潮汐波形は両者で良く合っている。

BBOBST-NX を実際の海域に設置し、BBOBS-NX の構造・設置方法によって、上記の傾斜変動を検出する精度・安定度が得られるかを、半年～1 年程度の長期観測を通じて検証する。これにより、海底面設置による多点での傾斜変動観測を実現するための基盤技術を確認させることを、本研究期間の間に狙うものである。海底という場での地殻変動観測は、地震観測と比較しても実質的に未踏領域にある。本研究では、地震発生予測の研究へ貢献する実用面を考慮した、面的な傾斜変動観測を実現するための手段を具体的に検討する点が学術的な特色で、これまでに国内外でも例の無い独創的な研究である。

本研究で、BBOBS-NX での観測程度に設置・展開が容易な海底傾斜変動観測が可能となれば、面的な観測点設置への道が開かれる。将来的には、オフラインでの観測だけでなく、海底観測ケーブルとの有機的結合も考えられ、海底下でのプレート間地震の準備～発生過程を現在よりもはるかに高度にリアルタイムで把握できるような観測データが得られることが、本研究の成果から予想される。

### 3. 研究の方法

現有の BBOBS-NX を基に、傾斜変動を知るためのマスポジション信号を地震動と共に記録するための改造を実施する。陸上での機能試験を

実施すると共に、無人潜水艇の利用機会を確保し、広帯域地震センサーが機械的に安定するために必要な期間、半年～1 年程度の連続観測を実施する。その観測結果を評価し、修正と改造を行った上で、長期連続観測を再度実施し、BBOBST-NX の観測能力を確認する。

### 4. 研究成果

2010 年に実施した陸上試験に引き続き、2011 年 7 月～2012 年 1 月に最初の海域試験観測を南海トラフ域で実施したが、センサー容器の一部で浸水がありデータを得られなかった。そのトラブル対応を済ませた BBOBST-NX を、四国海盆南西端での他の試験目的と合わせた試験観測として、2012 年 11 月～2013 年 2 月に行い、無事にデータを取得した。これらの試験観測では海底での計測環境を知るために流向流速(温度・水圧)も連続観測している。これは短期間のデータであるが、生データに見られる長期トレンドを関数当てはめにより取り除いた後、潮汐信号を baytap08 プログラムで除去し 1 週間長の移動平均をかけた結果を図 4 に示した。水深 4900m の深海盆で、水温変動が  $\pm 0.03^\circ\text{C}$  程度という環境下では、センサー自体に因ると思われるふらつきは  $\pm 0.4 \mu\text{rad}$  以下に収まっていた。

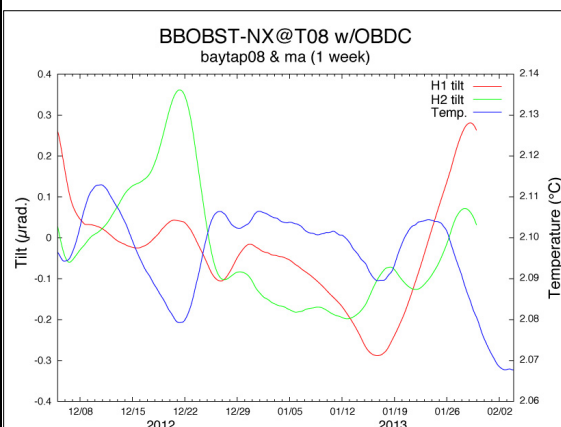


図 4. 四国海盆南西端での BBOBST-NX 試験観測結果。ほぼ 2 ヶ月間の記録で、水平動 2 成分の傾斜(赤・緑)と水温(青)を示した。縦軸の範囲は  $\pm 0.4 \mu\text{rad}$ 。温度と傾斜の関連性は見られない。底層流の速度は最大で 13cm/s 程度であった。

この成果を元に、2013 年 4 月から 1 年間、実際にスロースリップイベント(SSE)が数年間隔で発生している房総半島沖(水深 1400m)で、より現実的な環境下での実用試験観測を実施した(図 5)。この観測期間中、2014 年 1 月に設置地点ほぼ直下で SSE が発生し、陸上での GPS・傾斜観測で継続期間・領域が推定された。2014 年 4 月に無事 BBOBST-NX およびデータを回収し、その解析を進めた。1 年分のデータには、センサ



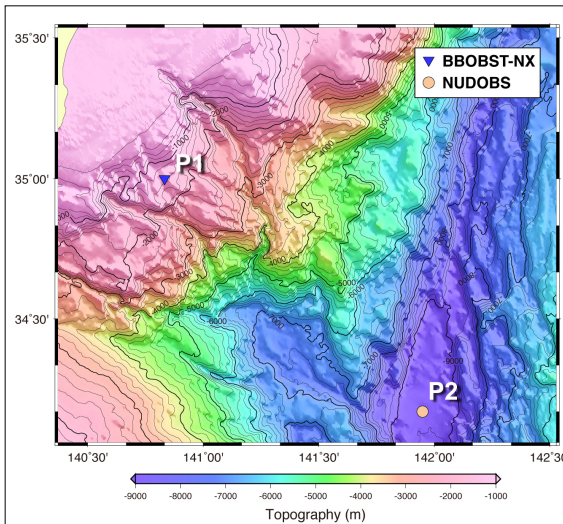


図 5. 房総半島沖での BBOBST-NX の長期試験観測地点(P1)。2013 年 4 月から 1 年間の地震・傾斜変動データを取得した。P2 地点には同じ航海で超深海域用新型 OBS を設置した。

一の振り子位置が中点から大幅にずれたのを戻す際の大きなステップ、及び小さな飛びが見られたが、ステップをシフトさせて関数当てはめを行い、ほぼ全観測期間の傾斜変動を得ることが出来た。図 4 と同様なデータ処理を施した結果を図 6 に示す。ここでは、陸上の傾斜観測から求められた SSE 継続期間を灰色の矩形、BBOBST-NX の上下動信号から 10-100 秒帯域の振幅エンベロップ変化を黄色のハッチで追加表示してある。

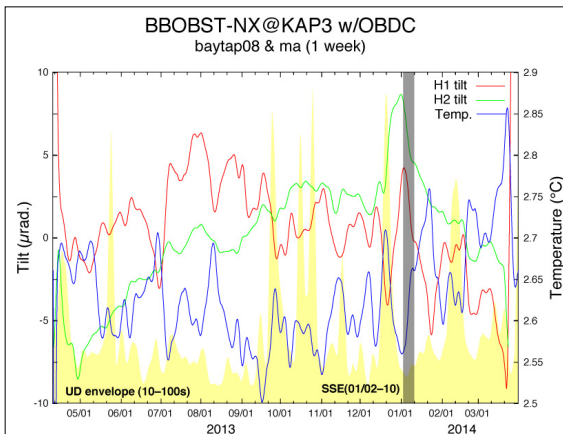


図 6. 房総半島沖での BBOBST-NX の長期試験観測から得た、約 1 年間の傾斜変動記録。SSE に先行した傾斜が H2 成分に明瞭に見える。H1 成分にも同様な傾斜があるが、水温変動と良い相関を示す変動が重なっているため不明確である。

この観測地点では底層流の最大速度は 35cm/s にも達していたが、SSE に伴うと考えられる傾斜変動を捉えることが出来た。H1 成分にのみ見られる、水温変動と相関が良い変動の原因であるが、H1 成分のセンサー方位・底層流の卓

越する流向・地形的特徴の走向が偶然一致しており、何らかの自然現象が反映されていることが予想される。このような状況下であっても、5 $\mu$ rad 以上の傾斜変動であれば、この BBOBST-NX により十分に検出可能である。SSE 発生領域直上に展開可能なことで、大きな傾斜変動が予想される点でも、このような方式による海底面での傾斜変動観測の有効性は検証されたと考えられる。但し、今回の観測期間は 1 年で、傾斜変動には年周変化が含まれている可能性があるため、より長期の試験観測を 2015 年から 2 地点で開始し、今後より進んだ検証を進める。

なお、本研究での海域観測においては、海洋研究開発機構の研究船利用公募により、「かいれい・かいこう 7000 II」および「なつしま・ハイパードルフィン」を複数回利用させて頂いたことに感謝申し上げます。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 8 件)

[1] 塩原 肇・篠原雅尚・中東和夫, 観測帯域拡大への高精度圧力計付き広帯域海底地震計の開発, 海洋調査技術, 26, 2, 1-17, 2014, 査読有。

[2] 一瀬建日・竹尾明子・塩原 肇, 観測記録を用いた海底地震計の時刻補正と時刻安定性, JAMSTEC Rep. Res. Dev., 19, 19-28, 2014, 査読有。

[3] D. Suetsugu, and H. Shiobara, Broadband Ocean Bottom Seismology, Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 42, 27-43, 2014, 査読有。

[4] M. Obayashi, J. Yoshimitsu, G. Nolet, Y. Fukao, H. Shiobara, H. Sugioka, H. Miyamachi, and Y. Gao, Finite frequency whole mantle P-wave tomography: Improvement of subducted slab images, Geophys. Res. Lett., 40, doi:10.1002/2013GL057401, 2013, 査読有。

[5] A. Takeo, K. Nishida, T. Isse, H. Kawakatsu, H. Shiobara, H. Sugioka, and T. Kanazawa, Radially anisotropic structure beneath the Shikoku Basin from broadband surface wave analysis of ocean bottom seismometer records, J. Geophys. Res., doi:10.1002/jgrb.50219, 2013, 査読有。

[6] H. Shiobara, T. Kanazawa, and T. Isse, New Step for Broadband Seismic Observation on the

Sea Floor: BBOBS-NX, IEEE-JOE, 38, 2, doi: 10.1109/JOE.2012.2222792, 396-405, 2013, 査読有.

[7] D. Suetsugu, H. Shiobara, H. Sugioka, A. Ito, T. Isse, T. Kasaya, N. Tada, K. Baba, N. Abe, Y. Hamano, P. Tarits, J.-P. Barriot, and D. Reymond, TIARES Project - Tomographic investigation by seafloor array experiment for the Society hotspot, Earth Planets Space, 64, i-iv, doi:10.5047/eps.2011.11.002, 2012, 査読有.

[8] M. Shinohara, K. Suyehiro, and H. Shiobara, CHAPTER 7.5 Marine seismic observation, in Bormann, P. (Ed.), New Manual of Seismological Observatory Practice (NMSOP-2), IASPEI, GFZ German Research Centre for Geosciences, Potsdam, DOI: 10.2312/GFZ.NMSOP-2\_ch7, 2012, 査読有.

[学会発表] (計 10 件)

[1] H. Shiobara, A. Ito, H. Sugioka and M. Shinohara, Possibility of tilt observation at the sea floor by using the BBOBST-NX system, 2014 AGU Fall Meeting, S13C-4477, SF, CA, USA, Dec. 15, 2014.

[2] H. Shiobara, H. Sugioka, A. Ito and M. Shinohara, BBOBS/BBOBS-NX and OBDC/OBEMC Bottom current observation to improve broadband ocean bottom seismometers, Modelling flow around Ocean Bottom Seismometers Workshop, WHOI, Woods Hole, MA, USA Nov. 10-12, 2014.

[3] 塩原肇・篠原雅尚・伊藤亜妃・杉岡裕子, 海底面での機動的傾斜観測によって直上で捉えた 2014 年 1 月房総沖スロースリップイベント時の傾斜変動, 日本地震学会 2014 年度秋季大会, C32-09, 朱鷺メッセ, 新潟市, 2014 年 11 月 26 日.

[4] H. Shiobara, A. Ito, H. Sugioka and M. Shinohara, New style OBS to the abyss, 2013 AGU Fall Meeting, S51A-2282, SF, CA, USA, Dec. 13, 2013.

[5] H. Shiobara, H. Sugioka, T. Isse, A. Ito, M. Shinohara and T. Kanazawa, OBSs with the self burying broadband sensor in the NOMan project and an new style OBS for the ultra-deep sea,

IRIS OBSIP, OBS Workshop, Redondo Beach, CA, USA, Oct. 21-22, 2013.

[6] 塩原肇・篠原雅尚・伊藤亜妃・杉岡裕子, 超深海域での海底地震観測への新たなる挑戦, 日本地震学会 2013 年度秋季大会, D11-13, 産業貿易センター, 横浜市, 2013 年 10 月 7 日.

[7] H. Shiobara, H. Sugioka, T. Isse, A. Ito, M. Shinohara and T. Kanazawa, BBOBS-NX: practical observation tool for broadband seismology at the seafloor, Joint Assembly IAHS-IASPO-IASPEI, SP3S1.05, Gothenburg, Sweden, July 23, 2013.

[8] H. Shiobara, H. Sugioka, T. Isse, A. Ito, A. Takeo and H. Utada, The first practical observation of the BBOBS-NX in the Normal Oceanic Mantle project, 2012 AGU Fall Meeting, S51C-2439, SF, CA, USA, Dec. 7, 2012.

[9] 塩原肇・篠原雅尚・一瀬建日・中東和夫, 広帯域海底地震計を基にした測地学的観測への取り組み, 日本地震学会 2012 年度秋季大会, D11-08, 函館市民会館, 函館市, 2012 年 10 月 17 日.

[10] H. Shiobara, M. Shinohara and T. Isse, New step toward geodetic range observations at the sea floor with the BBOBS system, 2011 AGU Fall Meeting, S51A-2187, SF, CA, USA, Dec. 9, 2011.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

塩原 肇 (SHIOBARA, Hajime)  
東京大学・地震研究所・教授  
研究者番号: 60211950

### (3) 連携研究者

篠原 雅尚 (SHINOHARA, Masanao)  
東京大学・地震研究所・教授  
研究者番号: 90242172

一瀬 建日 (ISSE, Takehi)  
東京大学・地震研究所・助教  
研究者番号: 60359180