

平成22年 5月17日現在

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2007～2009

課題番号：19340121

研究課題名（和文） 次世代の機動的な海底広帯域地震観測に向けた試験研究

研究課題名（英文） Study for mobile ocean bottom broadband seismic observation of the next generation

研究代表者

塩原 肇 (SHIOBARA HAJIME)

東京大学・地震研究所・准教授

研究者番号：60211950

研究成果の概要（和文）：

機動的な広帯域海底地震計(BBOBS)はすでに実用化し、多数の観測実績を挙げてきている。しかし、そのデータを評価すると、解析において重要な長周期の水平動成分でノイズレベルが高い。この問題を解決するため、BBOBS のセンサー部を分離し、小型・低背にすることで堆積物中へ突入させ、底層流の影響を受けない状態にすることが考えられる。この構想の下で新型のセンサーを開発し、実地での試験観測を行った。その結果、ノイズレベルを 1/10 以下に低減し、陸上観測点並のデータが得られることを確認した。

研究成果の概要（英文）：

We have already developed the mobile broadband ocean bottom seismometer (BBOBS), and many practical observations and the results have been achieved. But, the evaluation of the data shows that the noise level of horizontal components those are important in data analyses is rather high. To clear this problem, one idea of observation without effects of the bottom current is the use of small and low profile broadband sensor that enables to intrude into the sediment. We have developed the new sensor and performed several test observations. The results prove that this way of deploying the sensor unit can obtain seismic data like as land observatories.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	6,500,000	1,950,000	8,450,000
2008年度	4,500,000	1,350,000	5,850,000
2009年度	2,400,000	720,000	3,120,000
年度			
年度			
総計	13,400,000	4,020,000	17,420,000

研究分野： 数物系科学

科研費の分科・細目： 地球惑星科学・固体地球惑星物理学

キーワード： 観測手法・深海環境・地震・地球観測・海底地震計・広帯域地震観測

1. 研究開始当初の背景

ここ約 10 年間で、東京大学地震研究所が開発し実用化させてきた自己浮上方式の BBOBS は世界に先んじて数々の海域で多くの観測実績を挙げ、そのデータによる地球内部構造の解析成果も研究業績に記したように複数出てきている。しかしながら、陸上観測に匹敵する品質のデータを効率よく蓄積するまでには至っていない。自由落下・自己浮上方式の機動的な BBOBS では、センサーや記録部等が耐圧容器に収まっており、それを海底面上に置くという設置方法(図 1)をとってきた。しかし、長期地震観

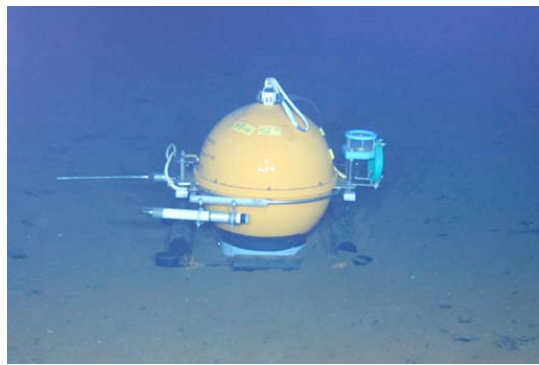


図 1 現行の広帯域海底地震計(BBOBS)の海底での状態。「しんかい 6500」より撮影(仏領ポリネシア、水深 4400m)。

測データのノイズモデル([注釈]参照)の解析結果を見ると、長周期側(10 秒～)での水平動成分のノイズレベルが陸上観測点での上限と同等から数倍、BBOBS 自身の上下動に対しては数 10 倍も高い(図 2)。一方で、上下動記録は陸

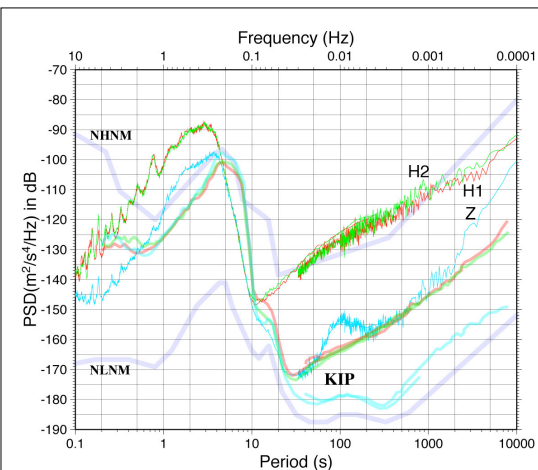


図 2 フィリピン海の BBOBS で得た、過去の観測点中で最も静かなノイズモデル。ハワイ島内の静かな観測点 KIP のもの(淡い色)と併せて表示してある。背景にある 2 つの太線(NHNM/NLNM)は統計的に求められた陸上観測点での地動ノイズの上限と下限。10 秒以上の帯域で、BBOBS の上下動成分(Z)は陸上観測点並だが、水平動(H1,H2)はノイズが大きい。

上観測点と比較して遜色ない。この状況は、定常観測に比べて短い観測期間中に効率良く、各種の解析に有効な 3 成分の地震記録を蓄積することへの大きな障害となっている。すなわち、人的・金銭的に多大な投資が必要な長期海底地震観測から、様々な解析手法を用い多くの研究成果を出すことが現状では困難である。しかしこれであっても、他国の同種 OBS と比較すると遙かに優れた観測システムである。

[注釈]「ノイズモデル」とは、地震の発生していない期間のデータを無作為に多数抽出し、それらを平均化した地動加速度のスペクトルである。国際標準であるこの手法をとることで、陸上を含めた任意の観測点での、客観的かつ絶対値による比較が初めて可能となる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、この問題点を解決する手法を継続的な実地試験観測により評価・改良し、次世代の機動的な海底地震観測手法として実用化の目処をたてることである。この新しい手法による新型センサーを装備する BBOBS を開発し、試験観測を発展的に繰り返し実施、データを評価して機器を改良することになる。最終的な目標は、潜水艇の支援を要しない自由落下・自己浮上方式を可能とさせる、機動的な次世代の新型 BBOBS の実用化である。

海底との結合向上や雑音低減のためにセンサー一部を海底に埋めるという発想は以前からあり、実際、広帯域センサーを入れた耐圧容器を埋めた試験観測例もある。この事例では陸上観測点に匹敵する低雑音な信号が得られることが示された。しかし、その後と同様な埋設方式の観測が試みられた数例では、十分な雑音レベルの低減は見られなかった。これらの間のどこに重大な違いがあり、何を改良することで理想的結果が得られるのかを、海底での試験観測を通じて実際に見出した上で、運用する上での実現性までを考慮した、「次世代の BBOBS」として完成させる道筋を開くことが、本研究の最も大きな学術的特色である。また、潜水艇の利用機会を確保するのは簡単ではなく、通常は年に 1 航海程度(数潜航)の機会しか得られない。本研究では潜水艇の利用を前提としない、自由落下方式によりセンサー一部を海底面に必要十分な程度に押し込み、かつ自己浮上回収を可能とするという観測機器・手法の開発が最終目標である。これは条件的に背反することも含む、非常に**独創的かつ挑戦的な開発研究**である。

地球内部構造をより詳細に解明していくためには地表面積の 2/3 を占める海域での広帯域地震観測が必要なことは研究者の間で広く認識されており、近年になって各国で海底広帯域地震観測を実施するための準備活動が進みつつある。しかし、直接的な地球科学的成果が得ら

れない、観測手法・機器の開発は未だ殆ど進んでおらず、この部分に本気で取り組む研究者が世界的にもほぼ皆無なのが現状である。本研究で実用的観測手法を完成させれば、水平動成分での大幅なノイズレベル低減が得られ、多点での同時展開を行う機動的な地震観測も使用する船舶を選ばないので容易に可能となる。すなわち、観測機会の増加、及び限られた観測期間のデータの中から解析に使用可能な地震データの質と量での飛躍的な増加が期待される。これにより、従来は陸上地震記録でのみ行われてきた地震波形を高度に利用した解析が適用され、広大な海域での地震観測データによる地球内部構造・ダイナミクス研究の新展開に繋がることが大きく期待される。本研究の成果を公開することによる、当該研究分野における国際的波及効果が多大なのは明白である。

3. 研究の方法

研究期間の3年間で、(1)専用の広帯域センサーを完成させ、海底観測用のシステムを作り上げ、(2)陸上の静かな観測点でそのシステムの機能確認としての試験観測を行い、(3)無人潜水艇を利用する機会を確保し、複数回の実地試験観測を行う、ことにした。

これまでのBBOBS観測結果から、水平動成分でのノイズレベルを上げている原因として、潮汐による底層流の変動によるBBOBS本体(耐圧容器)の傾斜変動が予想されていた。また、水平動成分も含め、BBOBSが設置される海底面上でもNLNMに匹敵するほど静かな時間が存在していることも分かっている。元々、陸上の普通の実験室などでは、BBOBSでのノイズレベルと比べても長周期でのノイズが非常に高い。すなわち、深海底での環境を陸上で再現してノイズ低減の効果を試験することは殆ど現実的ではなく、どうしても実際の海底で試験観測を行う必要がある。また、信頼できるノイズモデル解析を実行するには、季節的なノイズ変動や地震発生の影響を避けるために数ヶ月～半年の観測期間が望ましい。これらの条件を満たせるように、海洋研究観測機構の深海調査研究公募に応募し、無人潜水艇の利用機会を継続して確保する。そして、繰り返し観測で得られた結果を元にして、次の試験観測での機器の改良へ繋げる計画であった。

4. 研究成果

我々は2002年より、高性能な広帯域地震観測用センサーを開発している英国Guralp社と協同で、本研究に適した専用のセンサーの開発を進めてきた。海底面へ容易に押し込めるためには、地震計の3成分それぞれのユニットが分離可能で、各ユニットの外径が小さくて高さが低いことが必要となる。また、海底長期観測で基本となる、機械的強度が高いことや低消費電力であ

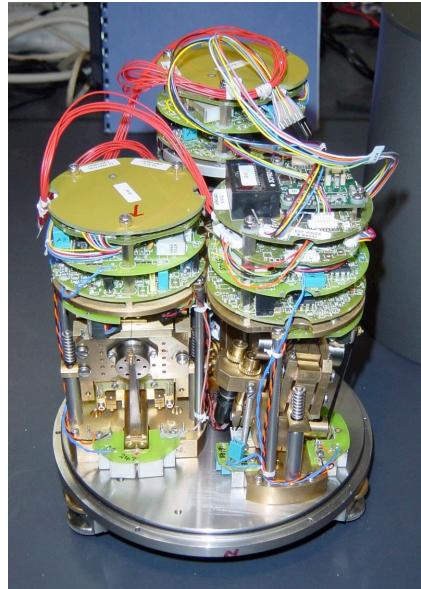


図3 新型の広帯域地震センサー。3成分の各ユニットが機械的に独立しており、分離可能である。手前右の上部には傾斜計を含む方位計が搭載されている。

ることも重要な要件である。本研究期間の初年度である2007年になりやっとこれらの条件を満たすセンサー(図3)が完成し、陸上での室内試験を実施した。それと共に、そのセンサー専用の耐圧容器の開発を行った。設計上の耐圧安全率は十分にとつてあるが、確実を期すために海洋研究開発機構にて実際の使用水深である6000m相当の圧力を実際にかけて問題がないことを確認した。また、2008年から深海底での試験観測を開始するため、深海調査研究公募へ応募し、ほぼ希望通り2回の無人潜水艇の利用機会を2008年6月と2009年1月に確保した。加えて、そのセンサーと既存のBBOBSで使用しているデータレコーダーとを接続するのに必要な制御回路の設計・製作も行った。

翌2008年には、まず海底に設置する状態にしたセンサー部を、地震研究所の鋸山観測坑にて機能試験を実施した。ここは深海底に比べれば高ノイズな環境であるが、センサーが正常に機能していることを確認できた。6月には、最初の実地試験観測を開始するため、海洋研究開発機構の無人潜水艇「かいこう7000II」を用いて、新型のBBOBS(以下、BBOBS-NX)1号機を海底まで輸送して機器の展開作業を行った(図4)。この試験観測は、過去のBBOBS観測研究で複数回の設置している四国海盆南西端の観測点で実施した。海底面は柔らかい粘土質であったのが、センサー部を海底面へ充分押し込むことが出来なかった(図5)。当初予定されていた2009年1月の航海が、燃料費高騰により一旦取り消され、3月に再度設定されたものの、海洋研究開発機構の都合で6月へと延期されてしまった。よって、この年度中には具体的な成

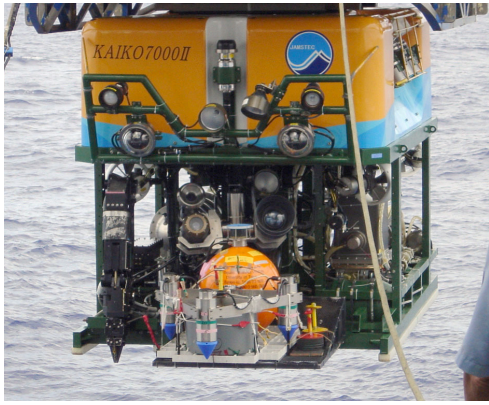


図 4 無人潜水艇「かいこう 7000 II」に搭載した BBOBS-NX の 1 号機。手前に見える 3 つの筒状容器が結合しているものがセンサー部、その奥のオレンジ色の球体が記録部である。

果を得ることが出来ずに終わった。翌年度に試験観測を継続するために、再度深海調査研究公募へ応募し、2009 年 8 月と 12 月の無人潜水艇利用の機会を確保した。

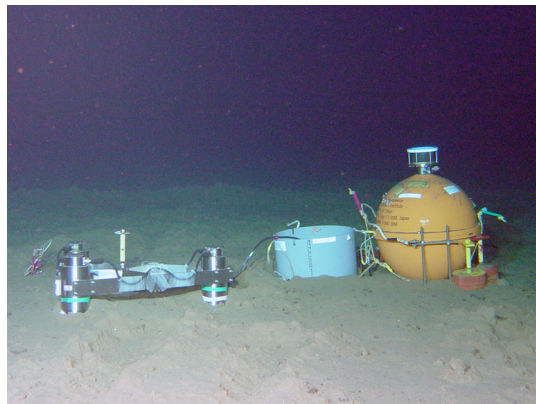


図 5 BBOBS-NX の 1 号機を海底で展開した状態。左のセンサー部は海底にあまり埋まっていない。記録部は直径 50cm のチタン球である。

研究期間の最終年度には、2009 年 6 月の航海で前年に設置した BBOBS-NX の 1 号機を回収すると共に、より理想的な設置状態にした 2 号機の設置を実施した。1 号機のデータを解析すると、予想以上にノイズレベルが高く、20 秒以上の長周期帯域で BBOBS に比べてノイズが約半分に低減した程度で、ほぼ NHNM であることが分かった。2 号機では、海面から自由落下させる(図 6)ことでセンサー部を海底面に突き刺して押し込む方法を取り、ほぼ狙い通りの設置状態にすることが出来た(図 7)。これは 8 月の航海で回収する予定であったが、海底での作業直前に無人潜水艇が故障したため、12 月の航海で回収を行った。この 2 号機のデータの解析から、上下動・水平動共に NHNM 以下のノイズモデルが得られることが

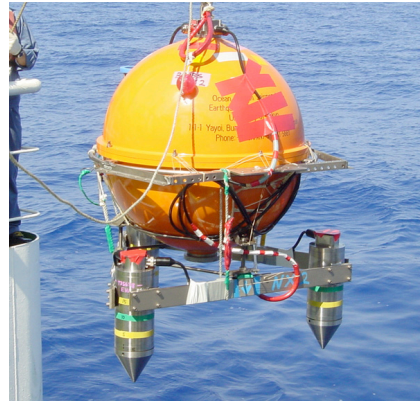


図 6 BBOBS-NX の 2 号機を海面から投入する直前の様子。センサー部の上に記録部(直径 65cm のチタン球)を固定しており、着底後に無人潜水艇で切り離し記録部を展開する。

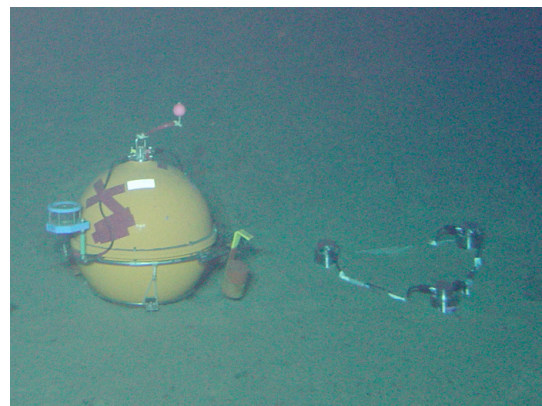


図 7 BBOBS-NX の 2 号機の海底での観測時の様子。自由落下によりセンサー部は海底にほぼ埋まっており、左側の記録部と水中ケーブルで接続されている。

確認された。より理想的なセンサー設置方法を探るため、この航海では 3 号機を 2 号機と同様に投入し、海底でセンサー部を展開後に、センサー上部の海中露出部を細かい砂で埋めた状態にした。この 3 号機は、8 月の潜水艇故障の代替航海として 2010 年 2 月に確保した機会に回収した。このデータの解析からも、2 号機と同様なノイズレベル改善が再度確認されたが、砂による埋設の効果は僅かであった。図 8 にこの最終的なノイズモデルを示した。

以上、実地での試験観測については、当初計画していた半年程度の観測期間は 1 号機以外では確保できなかったが、従来の自己浮上型の BBOBS との並行観測など、一応の評価を行いうる観測データを年度末にかけてやっと取得することが出来た。のべ、3 回の試験観測データからは、興味深い有意義な結果が得られている。センサー部を海底面へ十分に押し込めなかった 1 号機で

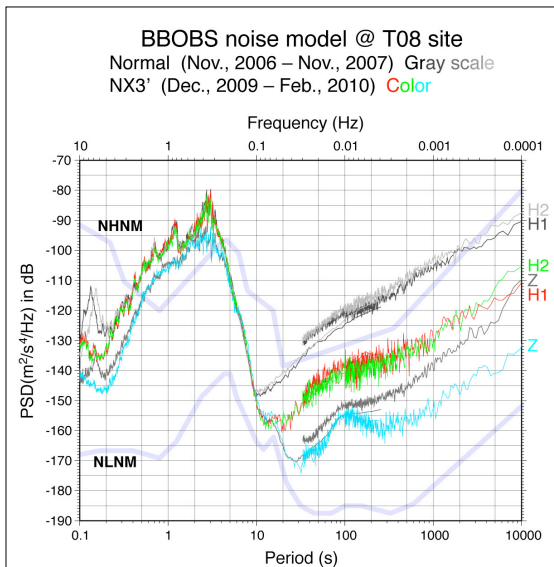


図 8 3号機の BBOBS-NX で得たノイズモデル (カラー表示)と、同地点での過去の BBOBS 観測から得たもの(グレー表示)を併せて示した。背景にある2つの太線は図2と同じNHNMとNLNM。10秒以上の帯域で、BBOBS-NXの上下動成分(Z)は BBOBS とほぼ同等だが、水平動(H1,H2)はノイズが 1/10 以下へ減少し、陸上観測点並のノイズレベルになっている。

は、BBOBS と比べ限られた周波数帯域でノイズが半減した程度であった。2号機以降では、この機器開発研究の最終目標である海面からの自由落下設置方法を採用することにより、センサー部を海底面の堆積物へ充分突入させることに成功した。これにより、10分の1以上のノイズ低減効果が2回の試験観測で共に確認され、陸上観測点並の地震観測を可能とする道筋が得られた。これにより、従来の BBOBS では10年かかる観測データの蓄積が、BBOBS-NX では1年程度でも可能となることが期待される事となった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

① 塩原 肇・金沢敏彦，海底地震計用軽量自律型センサーの開発，地震 2, 61, 137-144, 2009, 査読有。

[学会発表] (計4件)

① 塩原 肇，次世代海底広帯域地震計の試験観測，“フロンティア観測地球科学”ワークショップ，2010.03.23，東京大学地震研究所。

② 塩原 肇・金沢敏彦・篠原雅尚・一瀬建日・杉岡裕子・伊藤亜妃，次世代の広帯域

海底地震計の開発，日本地震学会 2009年度秋季大会，2009.10.23，京都大学。

③ Hajime Shiobara，Overview of Japanese broadband ocean bottom seismometers, Workshop for developing a broadband ocean bottom seismometer pool in the UK, 2009.09.15, NOC, Southampton, UK.

④ H. Shiobara, T. Kanazawa, M. Shinohara, H. Sugioka, A. Ito, T. Isse, First step for mobile ocean bottom broadband seismic observation of the next generation, AGU, Fall Meeting 2008, 2008.12.18, San Francisco, USA.

[その他]

航海報告 (計4件)

① H. Shiobara and T. Isse, KAIREI Cruise Report, KR10-E01, Research Dive by KAICO-7000II, 5-11 Feb. 2010, JAMSTEC, 2010.

② H. Shiobara, T. Kanazawa, H. Sugioka, K. Baba, A. Ito and T. Isse, KAIREI Cruise Report, KR09-11, Research Dive by KAICO-7000II, 21-26 Aug. 2009, JAMSTEC, 2009.

③ H. Shiobara, Y. Hamano, H. Toh, A. Ito, T. Isse and T. Minami, KAIREI Cruise Report, KR09-05, Research Dive by KAICO-7000II, 1-15 June 2009, JAMSTEC, 2009.

④ H. Shiobara, H. Sugioka, A. Ito and T. Isse, KAIREI Cruise Report, KR08-06, Research Dive by KAICO-7000II, 17-23 June 2008, JAMSTEC, 2008.

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・准教授
 研究者番号：60211950

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者

金沢 敏彦 (KANAZAWA TOSHIHIKO)
 東京大学・地震研究所・教授
 研究者番号：30114698

篠原 雅尚 (SHINOHARA MASANA0)
 東京大学・地震研究所・准教授
 研究者番号：90242172