

— 報 告 —

## ノイズ低減のための広帯域海底地震計設置実験

伊藤 亜妃<sup>1a\*</sup>, 杉岡 裕子<sup>1a</sup>, 荒木 英一郎<sup>1b</sup>

海底に設置された地震計は、0.1Hzより低い周波数帯域において海底底層流の影響を受けることが知られている。底層流による低周波ノイズを低減するためには、地震計と海底面とのカップリングを向上させる必要がある。本研究では、自由落下で地震計を設置する海底地震観測において低周波ノイズを低減するため、異なる形状のおもりを用いた比較実験を行った。従来の井型おもりと、新しく考案した平板おもりをそれぞれ装着した2台の海底地震計を、紀伊半島沖熊野灘に2007年12月末から2008年2月初旬の約2ヶ月間設置した。実験の結果、水平動成分に関しては両者のノイズレベルは変わらなかった。しかし、上下動成分に関しては、平板おもりを装着した地震計は従来の井型おもりと比べて0.01Hzより低い周波数帯域においてノイズレベルの低減がみられた。

キーワード：広帯域海底地震計，低周波ノイズ，おもり

---

2009年2月13日受領；2009年7月28日受理

1 独立行政法人海洋研究開発機構・地球内部変動研究センター

現在の所属

a：独立行政法人海洋研究開発機構・地球内部ダイナミクス領域

b：独立行政法人海洋研究開発機構・地震津波・防災研究プロジェクト

代表執筆者：

伊藤 亜妃

独立行政法人海洋研究開発機構・地球内部ダイナミクス領域

〒237-0061 神奈川県横須賀市夏島町2-15

046-867-9312

iaki@jamstec.go.jp

著作権：独立行政法人海洋研究開発機構

— Report —

## An installation experiment with broadband ocean bottom seismometers for reducing low frequency seismic noises.

Aki Ito<sup>1\*</sup>, Hiroko Sugioka<sup>1</sup>, Eiichiro Araki<sup>1b</sup>

A seismometer installed on the seafloor is affected by water flow, which could cause a noise in seismic records. The noise is significant especially for low frequencies below 0.1 Hz. For seafloor seismic observatories installed by free fall from a ship, it should be important to improve seafloor coupling of seismometer for reducing the low frequency seismic noise. In order to seek for an installation method that gives a better low frequency performance of seismometers, we conducted an installation experiment using two broadband ocean bottom seismometers with different types of anchor. The two seismometers were placed closely, within 150 m to each other: one with a conventional grid type anchor and the other with a wide planar anchor. The wide planar anchor was used to improve the seafloor coupling of seismometer. The experiment was conducted in the Kumano Basin off Kii Peninsula, from late December, 2007 to early February, 2008. For horizontal components, a noise level obtained from the seismometer with the planar anchor was comparable to that from the seismometer with the conventional anchor. For the vertical-component record, however, the seismometer with the planar anchor had the better noise performance than the seismometer with the conventional anchor at frequencies lower than 0.01Hz.

**Keywords** : Broadband ocean bottom seismometer, Low frequency noise, Anchor

---

Received 13 February 2009 ; Accepted 28 July 2009

1 Institute for Research on Earth Evolution, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

Present affiliation

b : Earthquake and Tsunami research project for Disaster Prevention, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

Corresponding author :

Aki Ito

Institute for Research on Earth Evolution, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

2-15 Natsushima-cho, Yokosuka 237-0061, Japan

+81-46-867-9312

iaki@jamstec.go.jp

Copyright by Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

## 1. 背景と目的

### 1.1. 背景

広帯域地震計を用いた海底地震観測は、1989年以降試験的に行われるようになった（例えばBeauduin and Montager, 1996）。掘削孔への設置、海底堆積物への表層埋設、海底設置型などの方法で観測が実施されており、1999年以降には自由落下・自己浮上式の海底設置型広帯域地震計による観測が実用化されている。

海底での広帯域地震観測を行う際、地震計が海底の水流の影響を受けるといった問題がある。特に、10秒より長い長周期帯においては、海底低層流に伴うと考えられる顕著なノイズが傾斜成分に現れる(W. C. Crawford et al., 1991; 2006)。海底低層流による影響を避けるために、これまでにいくつかの対策が検討されている。それらを大きく二つに分けると、(1)地震計を地中に埋設する方法(2)地震計と地面とのカップリングを改善する方法となる。

(1)の方法については、これまでODP掘削孔への設置が日本、米国、仏国によって試みられ、非常に安定な観測環境が得られることが示されている（例えばAraki et al, 2004）。また、海底堆積物への表層埋設についても、ハワイ島近傍での比較実験や釧路沖海底ケーブル地震計の埋設において、ノイズを減少させることが明らかとなった（例えばCollins et al., 2001）。

一方で、地震計を海底埋設しない場合でも(2)の方法のように観測装置と海底面との十分なカップリングを取ることができれば、ノイズの低減が可能である。自由落下・自己浮上式の海底設置型広帯域地震計を用いた観測は、孔内に設置された地震計を使用するものに比べ、設置回収が容易でありはるかに機動性が高い。使用船舶や海域などに制限がほとんどないため、1999年の機器開発以来広く観測が行われている。特に、地震波の長周期成分を用いた地球内部構造の研究においては、機動的な広帯域海底地震観測が欠かせない。

海底広帯域地震観測データの上下動成分を用いた研究が盛んに行われている一方で（例えばIsse et al., 2006; Tanaka et al., 2009）、水平動成分を用いた研究は多くない。水流の影響と考えられる低周波ノイズは、水平動成分に顕著に現れる。このノイズはLove波などの地震波シグナルの周波数帯域と重なり、水平動成分を用いた解析を困難にする。

これまでも、水平動成分の傾斜ノイズ軽減へむけた海底設置型広帯域地震計設置方法に関するひとつの改善策がなされた。従来、2箇所のリリーサ装置部分のみ地震計とおもりが接続されていたため、水平動二成分のノイズレベルに差が生じていた。現在では、地

震計とおもりの間の四辺のバランスを考えた支柱を用いるシステムを導入することで、傾斜成分のノイズの影響は水平動二成分で同程度になった。しかし、これだけでは水平動成分の長周期ノイズを低減するには充分ではない。

### 1.2. 目的

海底設置型広帯域地震計で見られる水平動成分の長周期ノイズ低減へのひとつの改善策として、海底面の設置面積を広げた平板型おもりを提案する。これにより、地震計と地面とのカップリングの改善を目指す。さらに、四辺の支柱システムにより水平方向の傾斜ノイズが均一化、低減したことを考慮して、おもりと地震計間との固定を水平方向に均一にするための円状のゲージを考案した。

この対策の効果を確認するため、従来の井型おもりと平板型おもりをそれぞれ装備した2つの海底地震計を紀伊半島沖熊野灘のほぼ同一環境に設置し、一ヶ月以上の期間の比較実験を実施した。自由落下、自己浮上式の機動的広帯域海底地震観測において、水平動成分の長周期ノイズを低減する観測手法を確立することが目的である。

## 2. 機器

### 2.1. 広帯域海底地震計

本実験で使用する広帯域海底地震計(BroadBand Ocean Bottom Seismometer; BBOBS)は、東京大学地震研究所で開発された。センサーには広帯域地震用センサーを使用し、同研究所製のレベリング(姿勢制御)装置に組込むことにより水平を保つ。センサーからの速度出力を増幅せずにサンプリングし、ハードディスクに書き込む。1年を超える長期連続観測が可能である。耐圧容器には直径65cmのチタン製球を使用している。船上からの音響通信により、記録開始停止、姿勢制御などを行う事が可能である。回収時には薄い2枚のチタン板を電食させ、おもりを切り離し自己浮上する。切り離しに要する時間は最大で20分以下である。BBOBSの主な仕様をTable 1に示す。

### 2.2. おもり

実験に使用する広帯域地震計は、2種類のタイプのおもりを装備している。一つ目は、これまでの自由落下・自己浮上式の海底設置型地震計を用いた観測で広く用いられてきたタイプである。外観をFig. 1に示す。地震計を収めたチタン球内の下部に、一辺1mの鉄製井型おもりを取り付けている(BBOBS-1)。おもりの空中重量

Table 1. Principal specifications for broadband ocean bottom seismometer.

<b>Outside</b>	
Size	1m x 1m x 0.7m (Width x Depth x Height)
Pressure case	Titanium sphere (D=0.65m, Buoyancy=70kg, Made in Russia)
Releasing mechanism	forced electric corrosion of two thin Ti plates (t=0.4~0.6mm)
Recovery control	Acoustic transponder system with recorder communication
Recovery aids	Radio beacon and Xenon flasher with light switch
<b>Inside</b>	
Sensor	CMG-3T for OBS (Guralp, UK) sensor, 360s~50Hz, 1500V/m/s, One vertical and two horizontal components
Active leveling unit	leveling works up to 20 deg. tilt
Analog unit	gain: 0 dB, LPF: 32Hz (4th-order Butterworth)
A/D	24bit (0~5V), 100Hz sampling, Win format like compression
Data media	two 1.8inch 40GB IDE HDDs
Power supply(for 100 days)	DD size lithium cells (ElectroChem, 3.6V 30Ah) Leveling unit: 2 cells (7.2V 30Ah) Sensor: 12 cells (14.4V 90Ah) Recorder: 12 cells (10.8V 120Ah)

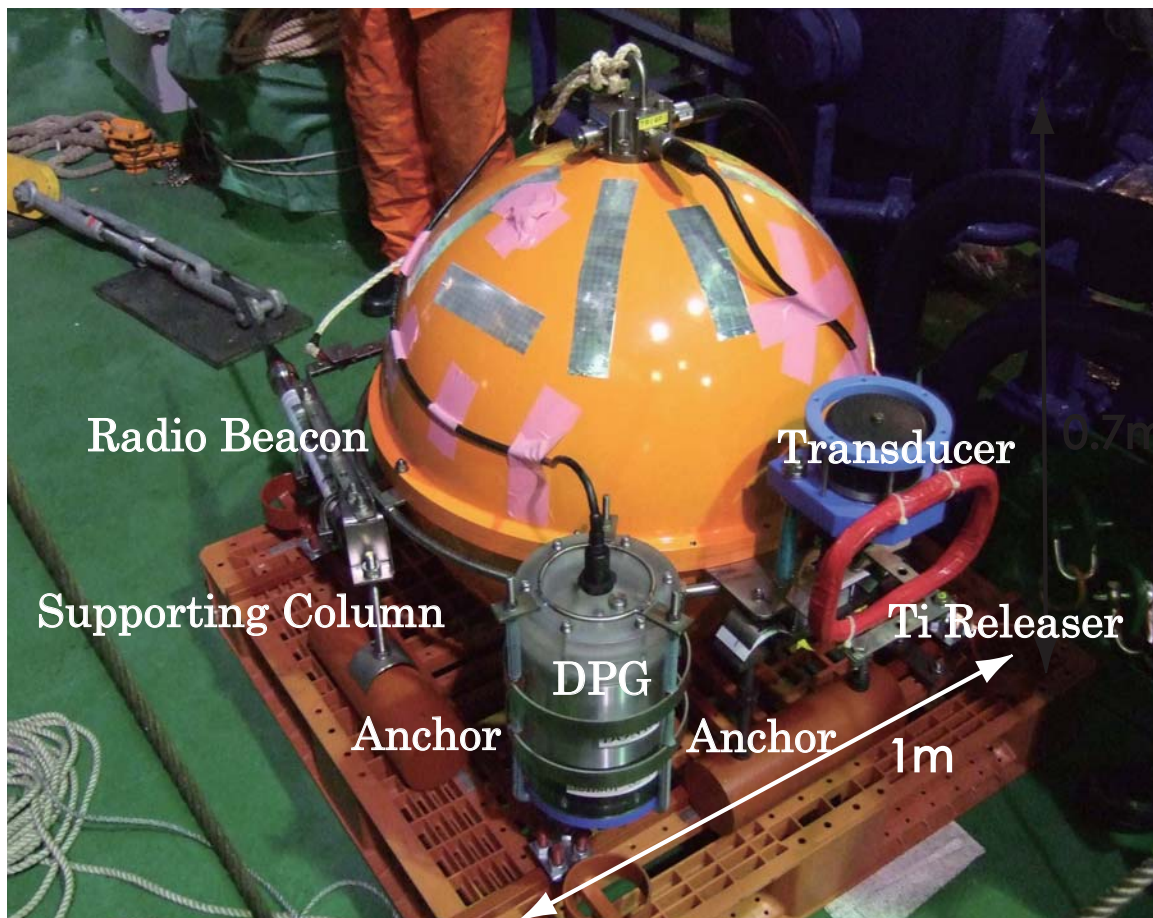


Fig.1. Broadband ocean bottom seismometer with conventional grid type anchor (BBOBS-1). BBOBS-1 was equipped with supporting columns to reduce tilting effect.



はおよそ90kgである。傾斜ノイズを軽減するための支柱システムを導入している。

二つ目は、上記の井型を平板に形状変更した新しいタイプのものである(BBOBS-2)。外観をFig. 2に示す。チタン球は、球の受け台となる直径60cm、高さ25cmの円柱状の鉄製ゲージで支えられている。このゲージの2箇所にはリリース部が取り付けられており、地震計とおもり部分とを接合している。円柱状のゲージの下部には、平板状の鉄製おもりが固定されている。平板は一辺1.7mの正方形をしており、板の厚さは0.2cmである。円柱ゲージと平板おもりのトータルの空中重量は、約130kgである。地震計を円柱状のゲージで支えているため、傾斜成分のノイズに偏りがでないことが期待される。また、広い面積でおもりと地面とが接することにより、地震計と地面とのカップリングの改善を目指す。

### 3. 実験内容

#### 3.1. 設置

2007年12月21日(JST)、紀伊半島沖熊野灘にて「なつしま」NT07-23航海で海底地震計の設置作業を行った。設置場所をFig. 3に示す。通常の井型おもりタイプの広帯域地震計BBOBS-1については、船上より自由落下により設置した。BBOBS-1には、Differential Pressure Gauge (DPG; 微差圧計)を外付け装備している。時刻校正は、投入日前日の12月20日に行った。

BBOBS-1を基点として、Fig. 2に示した平板型おもりタイプの海底地震計BBOBS-2を約150m程度の距離をとり設置した。平板おもりに取り付けられたアルミ製のつり冶具(網状カバー付き)を無人探査機「ハイパードルフィン」(HPD)に固定し、海底まで吊り下げた状態で運搬した(HPD # 775潜航)。平板形状による揚力が働くため、ビークルのスラスタを作動させる際には浮き上がる場面があった。最終的には海底に設置後、

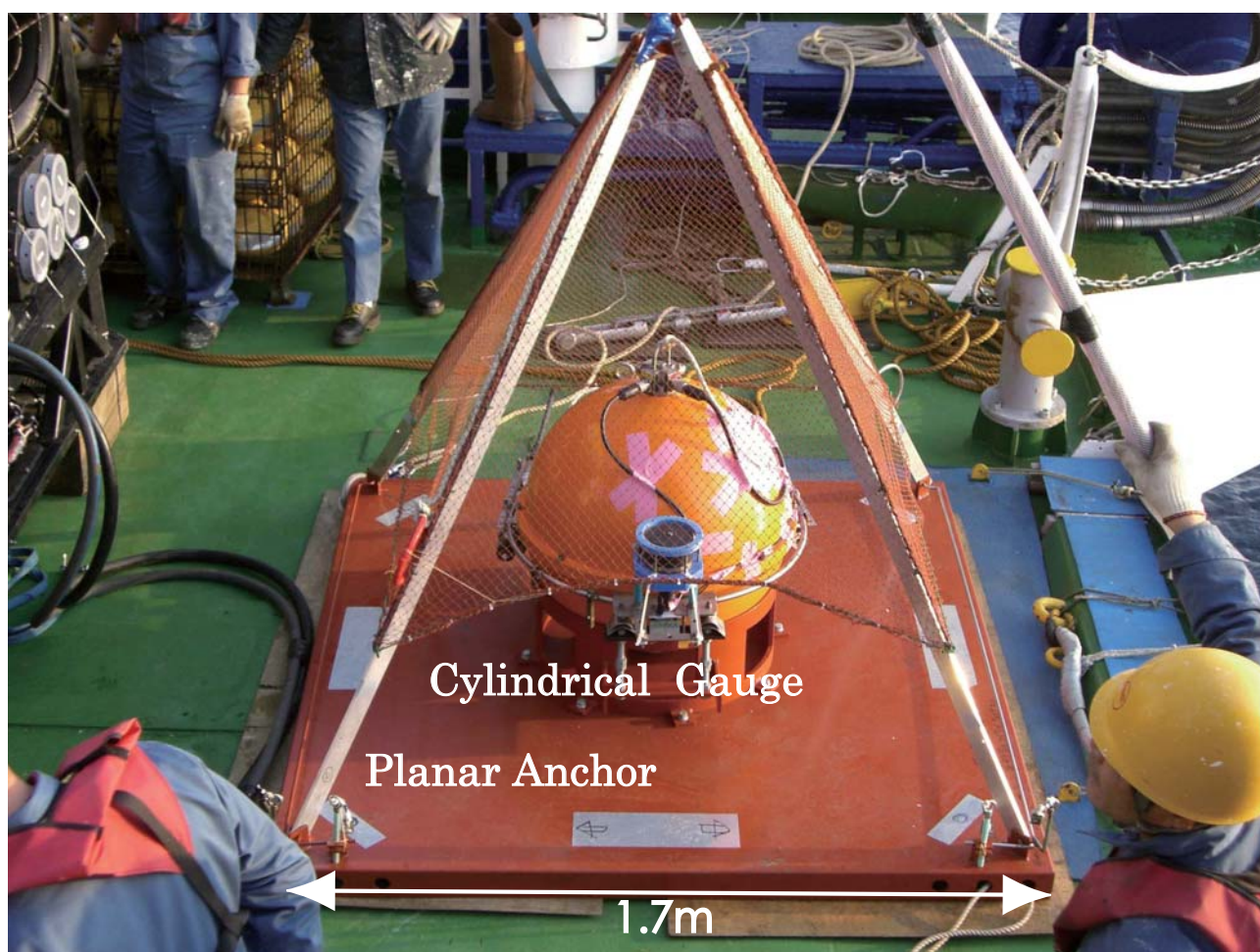


Fig.2. Broadband ocean bottom seismometer with wide planar anchor (BBOBS-2) before deployment.

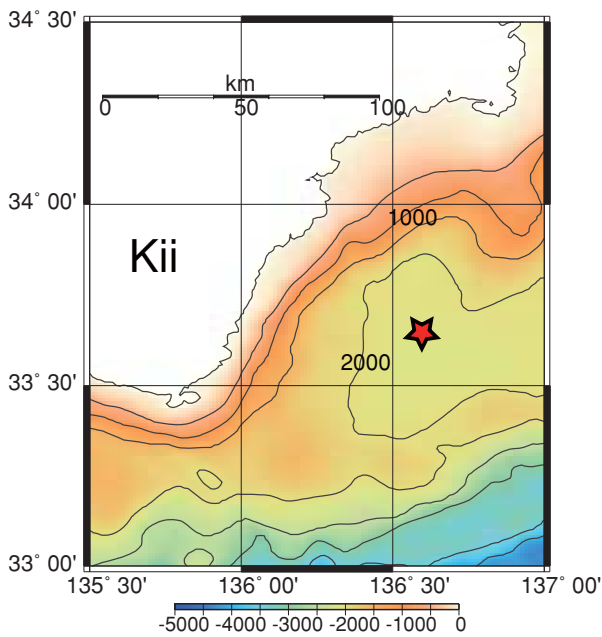


Fig.3. Location of test observation. Star indicates the location of installed two broadband ocean bottom seismometers.

ハイパードルフィンのマニピュレーターで平板を押し、海底面に固定されていることが確認された。つり冶具は、地震計設置完了後にハイパードルフィンにより取り外された。設置の状況を Fig. 4 に示す。

2つのBBOBSに対して船上からの音響通信により着底を確認した。その後3点測距を行い、一様音速構造(1.5km/s)を仮定し位置を決定した。その際、深度はハイパードルフィン潜航時(#775)に、ピークルが受けた水圧から換算した深度を与えた。両BBOBSに関して、記録開始後の地震計のマスポジションは、上下動、水平動二成分とも良好であった。設置位置については Table 2 にまとめた。

### 3.2. 回収

2008年2月6日(JST),「なつしま」NT08-04航海にて、BBOBS-1, BBOBS-2を自己浮上で回収した。船上からトランスデューサー投入後、約50分でBBOBS-1を、その50分後にBBOBS-2を船上に回収した。回収直後に時刻校正と通信を行い、常温になじますため一日程度お

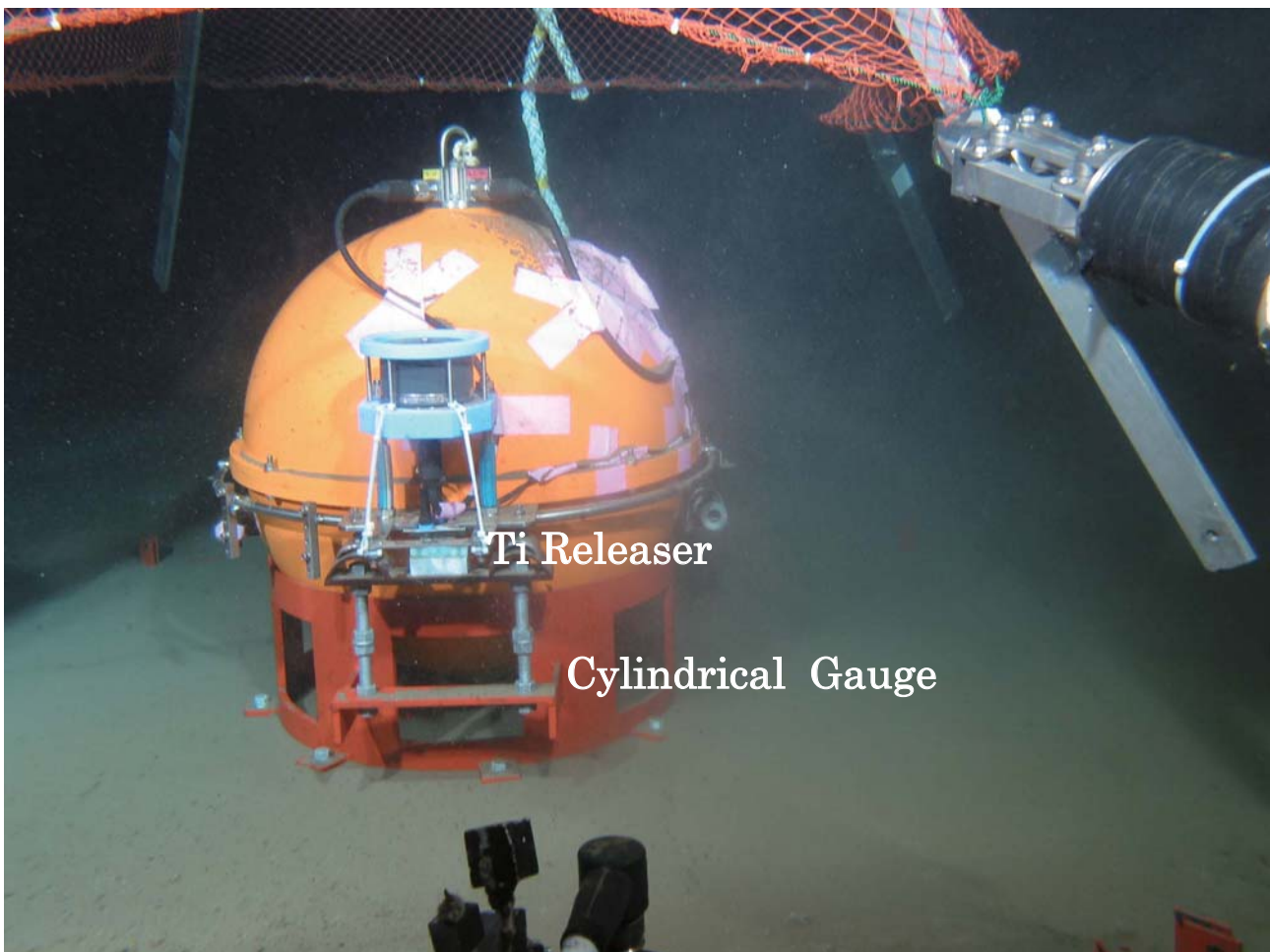


Fig.4. BBOBS-2 (with wide planar anchor) on the seafloor.



いた2月8日にチタン球を開封しデータを取り出した。広帯域地震計のほかDPGを装備したBBOBS-1, 広帯域地震計のみのBBOBS-2とも、データ容量は正常な値であった。記録期間をTable 2に示す。

#### 4. 結果

全観測期間の連続波形を確認した後、地震のない比較的静かな期間（2008年2月4日13:00~15:00 UTCの2時間分）を選び、上下動と水平動一成分のバックグラウンドノイズスペクトルを計算した。結果をFig. 5に示す。機器特性は取り除いている。BBOBS-1（井型おもり）の上下動、水平動一成分をそれぞれ赤色線と緑色線、BBOBS-2（平板型おもり）の上下動、水平動一成分をそれぞれ黒色線、青色線で示している。スペクトルをみると、上下動成分に関して250秒を超える長周期帯

域で、BBOBS-2（平板型おもり）のノイズが低いことがわかる。水平動成分に関しては、25秒より長周期帯域でBBOBS-2のノイズが高く、ノイズレベルの低減はみられない。なお、図には示していないが、両BBOBSとも水平動二成分のノイズスペクトルは同程度なものであり、その差は最大でも数dB程度であった。

また、全観測期間のランニングスペクトルを計算した。上下動成分のスペクトルをFig. 6に、水平動二成分のスペクトルをFig. 7に示す。左図がBBOBS-1（井型おもり）、右図がBBOBS-2（平板型おもり）のスペクトルを表す。個々の図の縦軸は観測開始からの時間、横軸は周波数帯域を表しており、左側が長周期帯、右側にいくほど短周期となる。図中の色はノイズの強さを表し、赤色ほどノイズレベルが高く、紫色ほどノイズレベルが低いことを表す。例えば、0.1Hzから1Hzの

Table 2. Location and test observation period of two broadband ocean bottom seismometers.

	Latitude	Longitude	Depth	Start (UTC)	End
BBOBS-1	33-38.8303 N	136-36.2466 E	2065 m	07/12/20 22:10:03	08/2/4 15:24:20
BBOBS-2	33-38.7685 N	136-36.1963 E	2064 m	07/12/21 07:56:49	08/2/4 15:10:36

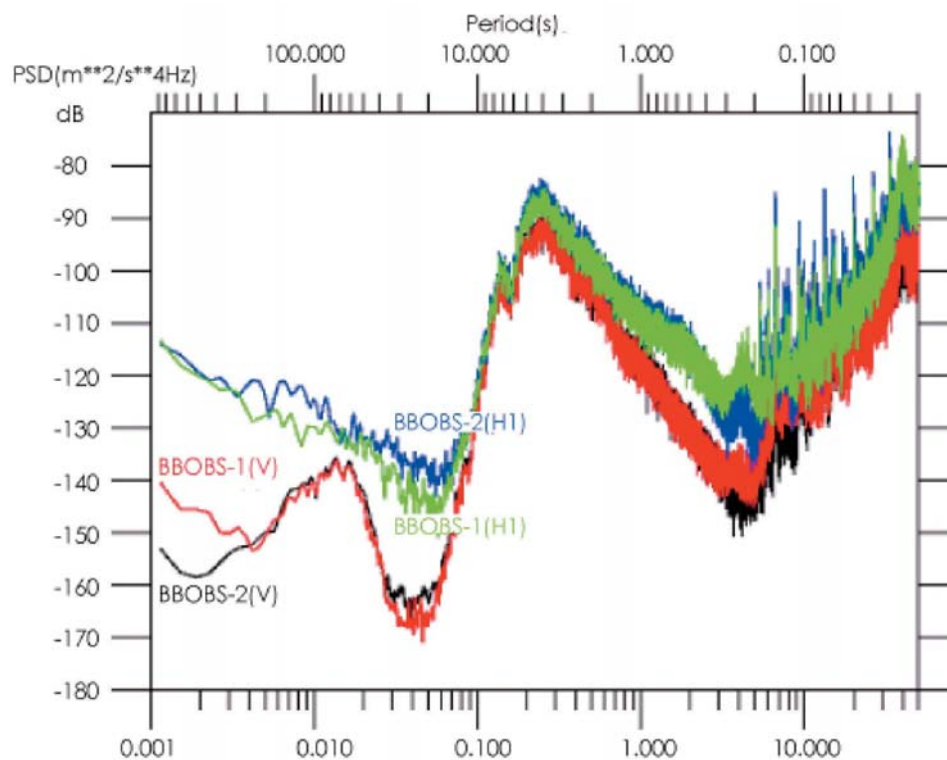


Fig. 5. Background noise spectrum of two broadband ocean bottom seismometers for 2 hours. Vertical and horizontal axes are intensity of background noise level and frequency, respectively. Red and green lines denote vertical and one horizontal component of BBOBS-1, respectively, and black and blue lines denote vertical and one horizontal component of BBOBS-2, respectively.

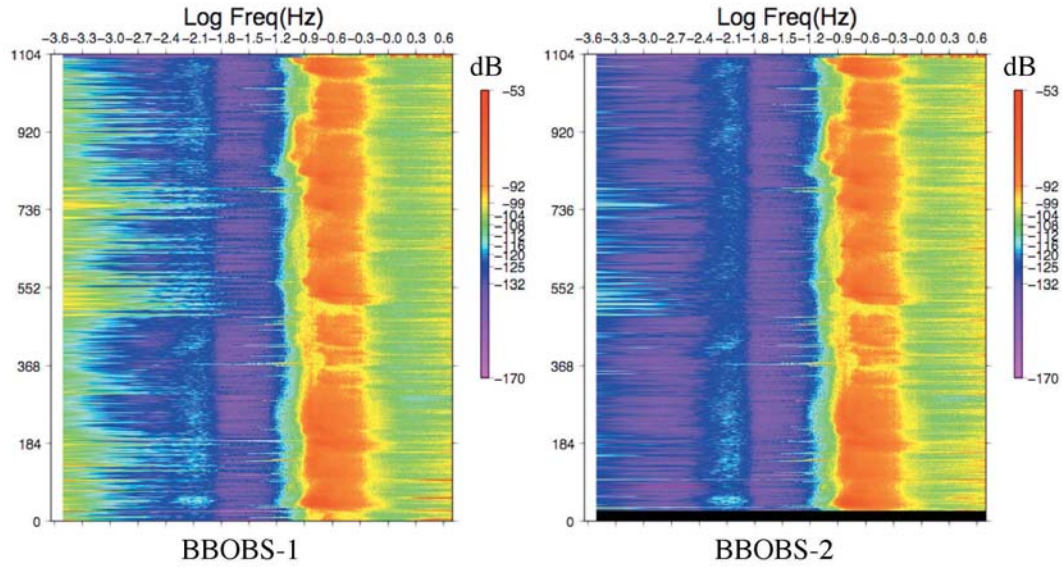


Fig.6. Running spectrum throughout entire test observation period for vertical component. Left and right figures show spectrum of BBOBS-1 (with grid type anchor) and BBOBS-2 (with wide planar anchor), respectively. Vertical and horizontal axes are elapsed time in hour and frequency, respectively.

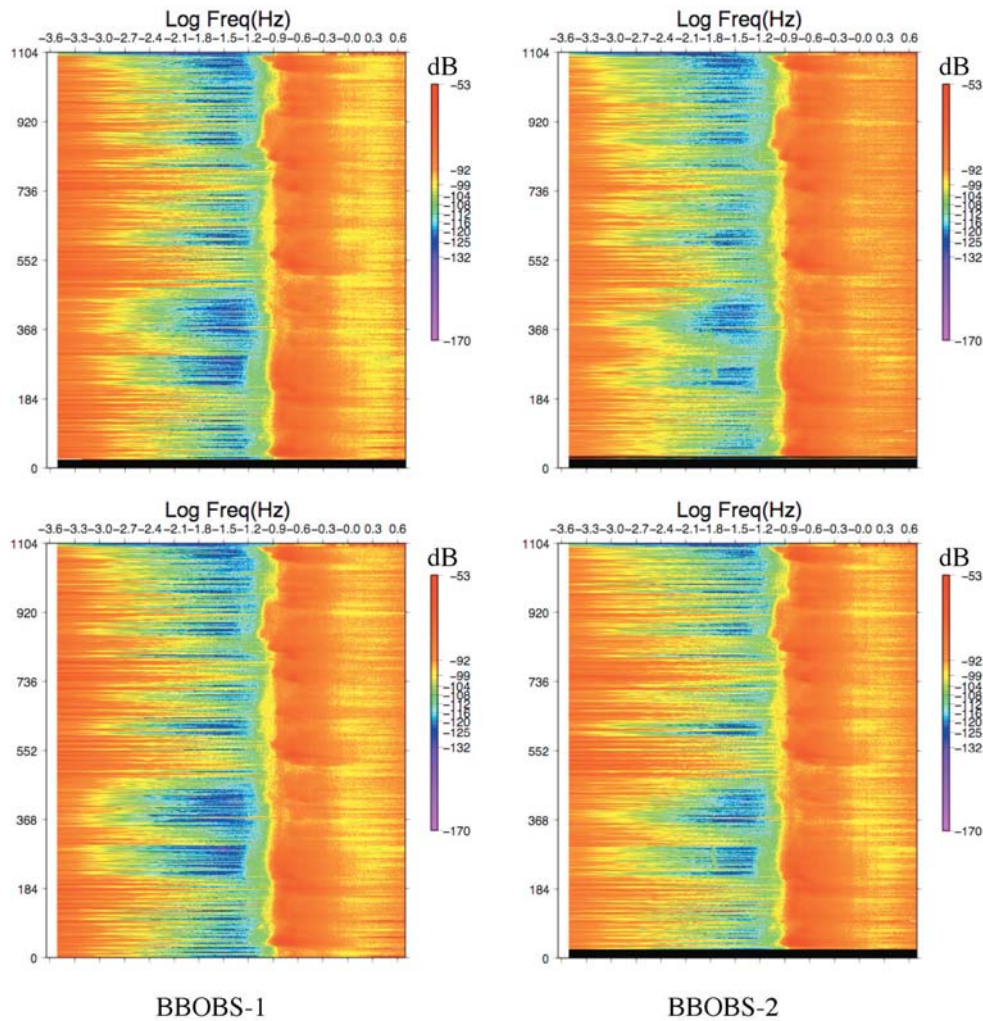


Fig.7. Running spectrum throughout entire test observation period for two horizontal components. Left and right figures show spectrum of BBOBS-1 (with grid type anchor) and BBOBS-2 (with wide planar anchor), respectively.



領域には脈動の影響が現れているため、赤色となっている。Fig. 6で示した上下動成分に関して、BBOBS-2（平板型おもり）の長周期側でのノイズが明らかに低減していることがわかる。しかし、Fig. 7に示した水平動成分に関しては、目立った差異は見られない。両BBOBSとも、水平動二成分に関してノイズレベルは同程度であった。

## 5. 考察

海底面の設置面積を広げた平板型おもりのBBOBSでは、上下動成分のノイズが250秒より長周期では明らかに低減している。平板型おもりを用いることで、井型のものよりも地震計と地面とのカップリングが向上したためと考えられる。一方、水平動成分に関しては目立ったノイズ低減は見られなかった。この原因のひとつとしては、水平方向に流れる低層流の周期と比較して平板おもりの設置面積が足りなかった可能性が挙げられる。

水平動二成分のノイズレベルに関しては、両BBOBSとも同程度であった。井型おもりを用いる観測では、これまでに四辺の支柱システムを導入することで傾斜ノイズの低減、均一化を実現している。今回実施した円柱状のゲージを用いる方法は、支柱を用いるシステムと同様に、水平方向の傾斜ノイズのレベル均一化に有効であると言える。

今回の実験では、地震計と地面とのカップリングを向上させる方法のひとつとして、おもりの設置面積を広くした。この方法は、上下動成分のノイズレベルを低減させるには有効であったが、水平動成分には効果が見られなかった。機動性の高い海底設置型地震観測を行うという点においては、今回試みた無人探査機による設置を必要とする形状のおもりでは限界があると考えられる。今後も引き続き、自由落下・自己浮上型広帯域海底地震計を用いた観測において、水平動ノイズの低減を目指す。

## 謝辞

NT07-23航海、NT08-04航海でBBOBSの設置・回収をして下さった船長ならびに船員の皆様、観測技術員の皆様に感謝を申し上げます。査読者である末次大輔氏、

一瀬建日氏からは貴重なコメントを頂き、論文改訂の上で大変有用でした。ここに感謝申し上げます。

## 引用文献

- Araki E., M. Shinohara, S. Sacks, A. Linde, T. Kanazawa, H. Shiobara, H. Mikada, and K. Suyehiro (2004), Improvement of Seismic Observation in the Ocean by Use of Seafloor Boreholes, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 94, 678-690.
- Beauduin, R. and J. P. Montagner (1996), Time evolution of broadband seismic noise during the French pilot experiment OFM/SISMOBS, *Geophys. Res. Lett.*, 23 (21), 2995-2998.
- Collins J.A., F. L. Vernon, J. A. Orcutt, R. A. Stephen, K. R. Peal, F. B. Wooding, F. N. Spiess, and J. A. Hildebrand (2001), Broadband seismology in the oceans: lessons from the Ocean Seismic Network Pilot Experiment, *Geophys. Res. Lett.*, 28 (1), 49-52.
- Isse T., D. Suetsugu, H. Shiobara, H. Sugioka, K. Yoshizawa, T. Kanazawa, and Y. Fukao (2006), Shear wave speed structure beneath the South Pacific superswell using broadband data from ocean floor and islands, *Geophys. Res. Lett.*, 33, doi:10.1029/2006GL026872.
- Tanaka S., M. Obayashi, D. Suetsugu, H. Shiobara, H. Sugioka, J. Yoshimitsu, T. Kanazawa, Y. Fukao, and G. Barruol (2009), P-wave tomography of the mantle beneath the South Pacific Superswell revealed by joint ocean floor and islands broadband seismic experiments, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 172, 268-277.
- W. C. Crawford, R. A. Stephen, and S. T. Bolmer (2006), A second look at low-frequency marine vertical seismometer data quality at the OSN-1 site off Hawaii for seafloor, buried, and borehole emplacements, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 96, 1952-1960.
- W. C. Crawford, S. C. Webb, and J. A. Hildebrand (1991), Seafloor compliance observed by long-period pressure and displacement measurements, *J. Geophys. Res.*, 96, 6151- 16160.