

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年6月7日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22540428

研究課題名（和文） 海溝型地震研究に向けた海底測地・地震観測のための  
海底圧力・地震計の開発

研究課題名（英文） Development of ocean bottom seismometer and pressure gauge  
for observation of earthquakes at plate boundary

研究代表者

篠原 雅尚 (SHINOHARA MASANAO)

東京大学・地震研究所・教授

研究者番号：90242172

研究成果の概要（和文）：

本研究は、現在使用されている長期観測型海底地震計に、圧力計を付加することにより、地震波の帯域から測地帯域までの超広帯域長期観測を可能とする海底地震計を開発することを目的とする。開発した海底圧力・地震計を用いて、南海トラフにおいて、試験観測を実施した。海洋潮汐を良好に記録していると共に、観測中に発生した平成23年東北地方太平洋沖地震の地震波および津波が記録された。本研究により開発された海底圧力・広帯域地震計は、現在観測に利用されており、ほぼ実用化の段階に達したと考えられる。

研究成果の概要（英文）：

Ocean bottom seismometers are widely used for earthquake observation on sea floor at the present. However, a frequency band of observations is limited from 360s to 50Hz. Because an observation band of a pressure gauge is broad, addition of a pressure gauge to an ocean bottom seismometer is useful for study of earthquake generation. We developed an ocean bottom seismometer and pressure gauge, and carried out observation in Nankai Trough region. In addition, the ocean bottom seismometer and pressure gauge was used for the aftershock observation for the 2011 Tohoku earthquake. The pressure gauges were recorded ocean tide, seismic waves and tsunamis of the 2011 event. The developed ocean bottom seismometer and pressure gauges are widely used for seafloor observation at the present.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
2012年度	900,000	270,000	1,170,000
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

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：高精度圧力計、海底圧力・地震計、海底上下変動観測、広帯域観測

## 1. 研究開始当初の背景

海溝型地震の予測・予知のためには、繰り返し地震を発生している領域であるアスペリティや地震を発生せずに滑りを起こしている領域（非地震性滑り域）の空間分布を精

度良く明らかにする必要がある。そのためには、直上である海底において地震波の帯域から測地帯域までの観測が必要である。

地震波帯域では、地震研究所が開発した広帯域海底地震計により、数十Hzから数百秒

程度までの観測が実現している[金沢・他、2009]。測地帯域での観測では、GPS-音響結合(GPS/A)方式による海底水平変動観測が実用化されつつある[藤本、2009]。しかしながら、GPS/A方式は、その計測方法の制約により、半年から数年以上の累積的な変化だけが計測でき、さらには上下方向の変動を計測することは不得意である。

数百秒から数ヶ月にわたる帯域での海底の上下変動を観測するためには、高精度の水晶発振子を用いた圧力計が適している。さらに、圧力計は数秒よりも短い周期まで観測可能であり、津波計としても利用可能である。一方、自己浮上式長期観測型海底地震計は、耐圧容器によりサイズが大きいチタン製球容器を使用することにより、1年以上の連続観測が実現されている。長期観測型海底地震計に、圧力計を付加することにより、地震波の帯域から測地帯域までの超広帯域長期観測が可能となる(図1)。

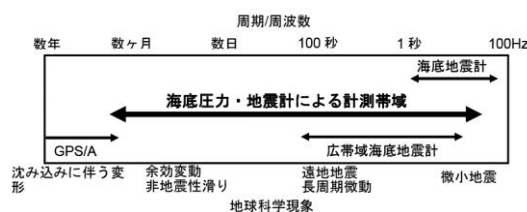


図1 海底圧力・地震計の計測帯域

## 2. 研究の目的

地震波の帯域の観測は、これまでに長期観測型海底地震計により、1年以上の長期連続観測に関しては十分に培われてきた実績がある。一方、水晶発振子を用いた圧力計による海底上下変動観測は、これまで試験的に行われてきているが、圧力計だけを用了測地帯域のみの観測である。また、少数の観測点による観測であることから、非地震性滑り域を明らかにするまでには至っていない。

本研究は、海溝付近でのアスペリティと非地震性滑り域の分布を解明するために、自己浮上式長期観測型海底地震計に圧力計を付加し、測地帯域まで観測する海底圧力・地震計を開発することを目的とした。なお、収録は連続収録とし、1年以上の観測ができることを目標とする。

本研究計画では、超広帯域海底圧力・地震計のプロトタイプ1台を開発し、それをを用いて、1年間程度実際に海底に設置し、試験観測を行うこととした。

## 3. 研究の方法

海溝付近におけるアスペリティや非地震性滑り域は、主に陸上のGPS観測網のデータから推定されているが、対象域直上の海底において測地帯域の観測を行うことにより、精度を上げる必要がある。

自己浮上式長期観測型海底地震計は、現在100台規模で実用化されており、高精度の震源決定を行うために、空間的に高密度(約20kmスパン)で観測を行っている[金沢・他、2009]。本研究では海底圧力・地震計を試作することとするが、技術開発が完了すれば、既存の長期観測型海底地震計に圧力計を付加することにより、空間的に高密度観測が可能となる。これは、精度のあげるためには、本質的なことである。

地殻変動のような長周期の現象の観測には、長期観測が不可欠であるが、海底における長期観測技術は海底地震計により培われている。圧力計の観測には、精度の良い周波数基準が必要である。従来の圧力計は高精度の周波数基準を搭載することが主に電源の制約から難しかったが、海底地震計には、刻時のための高精度水晶発振子が搭載されており、これを用いる。これまでに海底で観測を行えなかった数百秒から数ヶ月の変動を観測することにより、大地震に伴う余効変動や、ゆっくり滑りといった現象も観測可能である。

圧力計の選定、データ記録器の製作、既存の長期観測型海底地震計への搭載方法の検討を行い、海底圧力・地震計の試作器を開発した。開発した試作器は、実際に海底に1年程度設置した。回収後に、その記録の評価を行った。

### ・圧力計センサーの評価試験

圧力計センサーを、カタログデータなどを用いて、選定した後、評価試験を行うこととした。使用を想定している圧力計センサーは、測定範囲0~7,000m、分解能68Pa以下(上下変動では約1cm以下)、消費電力20mW程度のものであるが、使用温度変化や安定性などの評価を行った。特に海底地震・圧力計が自由落下設置自己浮上回収方式であり、設置回収時に衝撃が加わるので、耐衝撃性に注意を払う必要がある。圧力計センサーの消費電力は、観測可能期間に関わることであるが、水晶発振子を利用しているため、比較的小さく、長期観測には有利である。

### ・圧力計観測のためのレコーダの開発

圧力計センサーの評価試験と平行して、記録を行うレコーダの開発を行った。圧力計は、圧力変化を水晶発振子が発振する周波数の変化として出力される。そのため、レコーダは、出力されている周波数を記録すればよい。これは、周波数カウンターと同じであるが、そのためには基準となる周波数が必要である。現在地震研究所が用いている長期観測型海底地震計は、刻時のために $1 \times 10^{-8}$ の高精度水晶発振子を搭載しており、この出力を基準周波数源として用いた。開発したレコーダの特徴は以下の通りである。

### 1. 開発の容易さなどを考慮し、従来の海底

地震計用レコーダを改良せずに、単独のレコーダとした。

2. 半導体記録媒体にすべてのデータを記録することとした。近年半導体メモリーの容量が増加したために可能となり、低消費電力を実現できる。
3. レコーダは、周波数カウンター部、刻時部、記録部からなる。刻時と周波数カウンターの基準には、海底地震計刻時用の高精度水晶発振子を用いることで、部品点数の減少と低消費電力化を行った。
4. レコーダの消費電力は、30mW以下となった。

レコーダ開発中に、低消費電力で、超小型原子周波数発振器が利用できるようになり、この発振器を搭載することも可能なレコーダとした。

・圧力センサーの搭載方法の検討  
圧力計センサーの耐圧容器への取り付け方法の検討及び記録システムの設置方法について検討・設計を行い、試作器を開発した(図2)。



図2 広帯域海底地震計に装着した高精度水圧計(白矢印)

開発した海底圧力・地震計は、2011年2月に、南海トラフに設置し、2012年2月に回収した。さらに、2012年2月に、同一海域に、海底圧力・地震計を設置し、2013年2月に回収した(図3)。一方、海底圧力・地震計の試作がほぼ完了した2011年3月に平成23年東北地方太平洋沖地震が発生したために、余震観測にも開発した海底圧力・地震計を設置した。設置は本震直後の2011年3月で、同年9月に回収した(図4)。これらの観測から、海底における地震および水圧データが得られた。

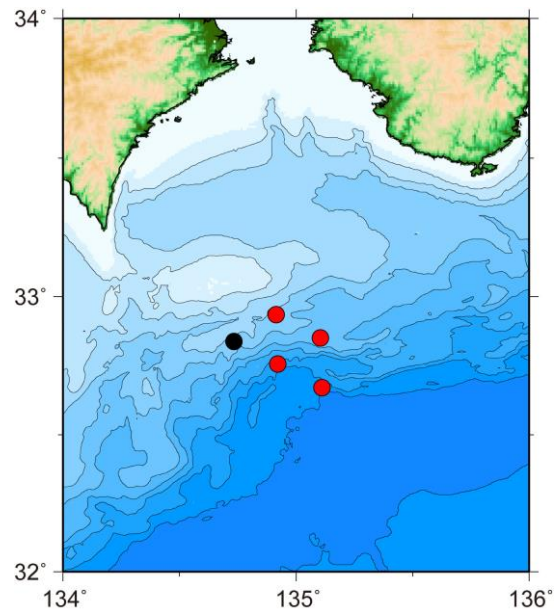


図3 南海トラフにおける設置位置。丸が2011年及び2012年に設置した広帯域海底地震計の位置を示す。黒丸は、2011年のみの設置である。このうち、2011年は1台、2012年は2台の海底圧力・地震計を設置した。

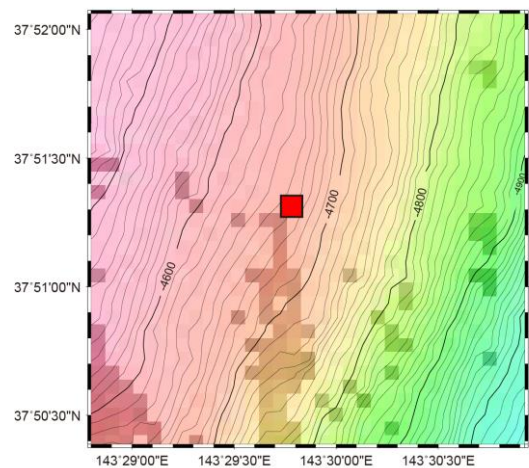


図4 平成23年東北地方太平洋沖地震余震観測における設置位置。宮城県沖で水深は約4,660mである。

#### 4. 研究成果

まずは、使用する圧力計センサーをカタログデータなどから、選定した。具体的は、Paroscientific社8B4000または8B7000を選択した。その後、このセンサーに対する評価を行い、圧力変動計測に関して十分な分解能を有していることを確認した。さらに、現在地震研究所が用いている長期観測型海底地震計用レコーダの刻時用の水晶発振器を利用して、記録を行うレコーダの開発を行った。その後、圧力計センサーの耐圧容器への取り付け方法の検討及び記録システムの設置方

法について検討・設計を行い、試作器を開発した。

開発した海底圧力・地震計は、試験観測データを取得するために、南海トラフにおいて、2011年2月から、1回の回収・再設置を経て、約2年間の観測を実施した。回収された広帯域海底地震計に搭載した高精度水圧計のデータは Leroy and Parthiot [1998]の式を用いて水深に変換した。水深に変換したデータを BAYTAP-G [Tamura et al., 1991]を用いて解析し、潮汐成分、トレンド（ドリフト）成分、イレギュラー成分に分解した。トレンド成分にはセンサー固有の特性によるドリフト成分が含まれている。観測期間中には、残念ながら、観測域付近では顕著な地殻変動は観測されなかったが、2011年3月に発生した平成23年東北地方太平洋沖地震（マグニチュード9.0）により発生した地震動や津波による圧力変化が明瞭に記録された（図5）。

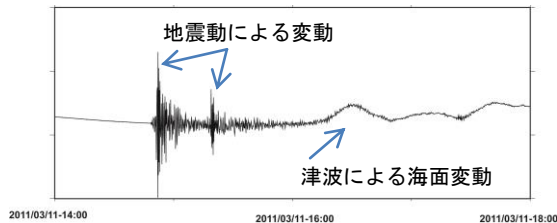


図5 2011年3月11日14時から18時までの高精度水圧計の記録。圧力計の記録には地震動による変動を記録したあとに津波による海面の変動を記録したと思われる圧力変化が記録されている。

また、平成23年東北地方太平洋沖地震の余震観測のために設置した海底圧力・地震計からは、観測域付近で発生した規模の大きな余震に伴うと思われる上下変動を観測することができた（図6）。

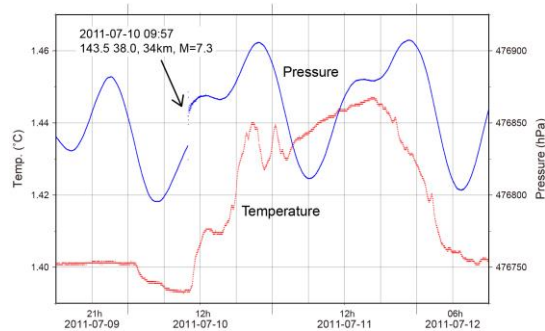


図6 2011年7月9日18時から7月12日12時までの高精度水圧計の記録。7月10日9時57分に近傍で発生したマグニチュード7.3の余震に伴う海底上下変動と思われる圧力変化が記録されている。

本研究により開発された海底圧力・広帯域地震計は、現在観測に利用されており、ほぼ実用化の段階に達したと考えられる。

## 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4件）

① Shinohara, M., T. Yamada, K. Nakahigashi, S. Sakai, K. Mochizuki, K. Uehira, Y. Ito, R. Azuma, Y. Kaiho, T. No, H. Shiobara, R. Hino, Y. Murai, H. Yakiwara, T. Sato, Y. Machida, T. Shinbo, T. Isse, H. Miyamachi, K. Obana, N. Takahashi, S. Kodaira, Y. Kaneda, K. Hirata, S. Yoshikawa, K. Obara, T. Iwasaki, and N. Hirata, Aftershock observation of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake by using ocean bottom seismometer network, Earth Planets Space, 63, 835-840, 2011.

② Shinohara, M., Y. Machida, T. Yamada, K. Nakahigashi, T. Shinbo, K. Mochizuki, Y. Murai, R. Hino, Y. Ito, T. Sato, H. Shiobara, K. Uehira, H. Yakiwara, K. Obana, N. Takahashi, S. Kodaira, K. Hirata, H. Tsushima, and T. Iwasaki, Precise aftershock distribution of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake revealed by ocean bottom seismometer network, Earth Planets Space, 64, 1137-1148, 2012.

③ Nakahigashi, K., M. Shinohara, K. Mochizuki, T. Yamada, R. Hino, T. Sato, K. Uehira, Y. Ito, Y. Murai, and T. Kanazawa, P-wave velocity structure in the southernmost source region of the 2011 Tohoku earthquakes, off the Boso Peninsula deduced by an ocean bottom seismographic survey, Earth Planets Space, 64, 1149-1156, 2012.

④ 篠原雅尚, 海底地震観測網による2011年東北地方太平洋沖地震の余震観測, 超音波テクノ, 24, 5, 30-35, 2012.

〔学会発表〕（計13件）

① 篠原雅尚・町田祐弥・山田知朗・中東和夫・真保敬・望月公廣・村井芳夫・日野亮太・伊藤喜宏・佐藤利典・塩原肇・植平賢司・八木原寛・尾鼻浩一郎・高橋成実・小平秀一・平田賢治・対馬弘晃・岩崎貴哉, 海底地震観測網による2011年東北地方太平洋沖地震の余震分布, 日本地球惑星科学連合2012年度連合大会, 幕張(日本), 5月25日, SSS39-P09, 2012.

- ②篠原雅尚, 2011年東北地方太平洋沖地震に関する総合調査, 第49回自然災害科学総合シンポジウム, 京都(日本), 9月11日, 2012.
- ③篠原雅尚・塩原肇・望月公廣・山田知朗・一瀬建日・村井芳夫・日野亮太・藤本博己・木戸元之・伊藤喜宏・佐藤利典・清水洋・八木原寛・酒井慎一・小原一成・平田直, 新しいプレート境界モデルに向けた海底地震地殻変動モニタリング観測研究と技術開発, 日本地震学会 2012年度秋季大会, 函館(日本), 10月19日, A31-03, 2012.
- ④篠原雅尚, 紀伊半島沖における稠密・広帯域海底地震観測, 「連動性評価研究」成果報告会, 大阪(日本), 7月8日, 2012.
- ⑤Shinohara, M., Seafloor Seismic and Geodetic Observations Around Northeastern Japan arc, Pacific Rim Subduction Workshop, Tokyo (Japan), Nov. 17, 2012.
- ⑥篠原雅尚・町田祐弥・山田知朗・中東和夫・真保敬・望月公廣・村井芳夫・日野亮太・伊藤喜宏・佐藤利典・塩原肇・植平賢司・八木原寛・尾鼻浩一郎・高橋成実・小平秀一・平田賢治・対馬弘晃・岩崎貴哉, 海底地震計観測網から求めた2011年東北地方太平洋沖地震の精密余震分布, 海洋調査技術学会第24回研究成果発表会, 東京(日本), 11月8-9日, 7, 2012.
- ⑦Shinohara, M., Y. Machida, T. Yamada, K. Nakahigashi, T. Shinbo, K. Mochizuki, Y. Murai, R. Hino, Y. Ito, T. Sato, H. Shiobara, K. Uehira, H. Yakiwara, K. Obana, N. Takahashi, S. Kodaira, K. Hirata, H. Tsushima, and T. Iwasaki, Precise aftershock distribution of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake revealed by ocean bottom seismometer network, 2012 AGU Fall Meeting, San Francisco (USA), Dec. 3, T13A-2585, 2012.
- ⑧篠原雅尚・山田知朗・中東和夫・酒井慎一・望月公廣・植平賢司・伊藤喜宏・東龍介・海宝由佳・野徹雄・塩原肇・日野亮太・村井芳夫・八木原寛・佐藤利典・町田祐弥・真保敬・一瀬建日・宮町宏樹・尾鼻浩一郎・高橋成実・小平秀一・金田義行・平田賢治・吉川澄夫・小原一成・岩崎貴哉・平田直, 海底地震計ネットワークによる2011年東北地方太平洋沖地震の緊急余震観測, 日本地球惑星科学連合 2011年度連合大会,

幕張(日本), 5月27日, MIS036-P89, 2011.

- ⑨篠原雅尚, 海底地震計ネットワークによる緊急余震観測から見る平成23年東北地方太平洋沖地震, 第41回海洋工学パネル, 東京(日本), 7月27日, 2011.
- ⑩篠原雅尚, 2011年東北地方太平洋沖地震に関する総合調査, 第48回自然災害科学総合シンポジウム, 京都(日本), 9月13日, 2011.
- ⑪Shinohara, M., Y. Murai, R. Hino, T. Sato, H. Shiobara, K. Uehira, H. Miyamachi, S. Kodaira, Y. Kaneda, K. Hirata and OBS observation group, Aftershock Observation of the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake by Ocean Bottom Seismometer Network, Asia Oceania Geosciences Society 2011, 台北(中華民国), Aug. 12, SE87-A027, 2011.
- ⑫篠原雅尚, 海域観測による東北地方太平洋沖地震の海底地殻変動・余震活動, 平成23年東北地方太平洋沖地震に関する成果報告シンポジウム, 仙台(日本), 8月20日, 2011.
- ⑬篠原雅尚, 2011年東北地方太平洋沖地震に関する海域観測, 海洋アライアンス緊急ワークショップ「東北地方太平洋沖地震・津波」, 東京(日本), 4月22日, 2011.

[図書] (計2件)

- ①篠原雅尚(共著), 地震に克つニッポン、32-33、112pp、小学館、2012
- ②篠原雅尚(共著), 海の大国ニッポン、98-103、112pp、小学館、2011

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

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

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

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