

令和元年6月17日現在

機関番号：82706

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K01323

研究課題名(和文) 振動実験と現場観測に基づく地震発生時の水圧式津波計のデータ特性評価

研究課題名(英文) Pressure standard experiment supporting the interpretation of bottom pressure recorder in-situ observations

研究代表者

松本 浩幸 (MATSUMOTO, Hiroyuki)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・地震津波海域観測研究開発センター・技術研究員

研究者番号：80360759

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：沖合の海底に設置される水圧式津波計は、地震時に大振幅の水圧変動を記録し、これが津波即時予測における技術検討課題となっている。本研究では、重錘形圧力天びんによる室内実験で得られた知見から、海底現場の水圧式津波計に残されたこの課題について考察した。

2017年11月16日に八丈島東方沖で発生した地震時に、室内実験で重錘形圧力天びんの重錘が振動して海底での圧力変動を再現した。地震時の南海トラフの「地震・津波観測監視システム(DONET)」で得られた海底現場の記録との比較から、水圧式津波計が記録する大振幅の水圧変動は、水塊に作用する地動の加速度に相関する海底現場の圧力変動であることが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在、日本の周辺海域には多数の水圧式津波計が展開されており、津波警報の更新や津波観測情報の発信等へ利用されている。水圧式津波計は津波観測の情報を沿岸到達前に取得できる手段として普及していることから、津波観測時には波高を正確に推定することが不可欠である。

本研究で得られた成果から、海底地震計を併用することで水圧式津波計のデータから地震発生時の水圧変動等を除去でき、津波波高を高精度に推定できることが見込まれる。したがって本研究で得られた知見は、海底圧力計のリアルタイムデータ利用の高度化に資するものである。

研究成果の概要(英文)：A laboratory experiment using a pressure standard (i.e., a dead weight pressure calibrator) has been performed to investigate the in-situ response of bottom pressure recorders (BPRs) during an earthquake.

On November 16, 2017 at 09:43 UTC, an earthquake with a magnitude of 5.8 occurred off the east of Hachijo Island. In-situ recordings were obtained by BPRs and two kinds of seismometers of the DONET seafloor observatory in the Nankai Trough. We have carried out a laboratory experiment with three BPRs connected to the pressure standard during the earthquake, which provided the first opportunity to compare in-situ data with laboratory pressure measurements.

Various features of pressure fluctuation and ground motion were comparable between the laboratory experiment and the in-situ observation. The pressure fluctuation recorded by BPRs during an earthquake follows the acceleration that forces the water mass above the BPRs.

研究分野：地震工学

キーワード：海底津波計 地震動 動水圧 重錘形圧力天びん

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

南海トラフの「地震・津波観測監視システム (DONET)」や東日本の「日本海溝海底地震津波観測網 (S-net)」のように、津波の早期検知を目的として水圧式津波計 (以下、圧力計と呼称する。) が巨大地震発生帯の深海底に設置されている。圧力計は、海底の圧力変化を計測することで水深変化を波高に換算する仕組みで、津波の波高を計測する。沖合の圧力計による観測値は津波警報システムに利用されており、津波観測情報として発表される。しかしながら、海底に設置された圧力計は、地震時には津波による水圧変動以外にも大振幅の水圧変動を記録し、これが津波即時予測における技術検討課題となっている。この大振幅の水圧変動は地震動による水圧変動と考えられているが、地震時には圧力計も揺れるため、圧力計内部の機械的振動を記録している可能性も否定できない。

2. 研究の目的

本研究では、圧力計に残されたこの課題について重錘形圧力天びんによる室内実験で得られた知見から、海底に設置された圧力計が記録する現象について考察し、圧力計の観測データの高度利用に資することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 室内実験の概要

本研究の室内実験で利用する重錘形圧力天びんの計測システムは、重錘形圧力天びん (DH Instruments 社、PG7302) と圧力コントローラ (DH Instruments 社、PPCH) を組み合わせて運用している (以下、圧力天びんと呼称する。) (図 1)。ピストン-シリンダと重錘が、圧力天びんの主要な構成要素である。ピストン上に搭載した重錘に作用する下向き重力とピストン底面に作用する圧力による上向きの力が平衡したとき、ピストンが浮上して一定の圧力が得られる原理により、圧力天びんは高精度の基準圧力を生成する。PG7302 はピストン位置を常に監視しており、ピストン-シリンダ間のオイル漏れや雰囲気温度の変化等でピストン位置が変化する場合には、PPCH が供給圧力を補償してピストンが適正な位置に戻るよう自動制御し続けるため、圧力天びんの連続運用が可能である。またピストンに搭載する重錘の組み合わせを変えることで、任意の基準圧力を設定できる。

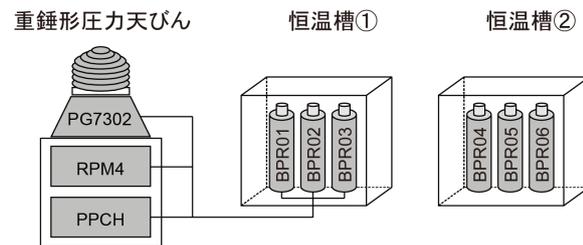


図-1 室内実験の主要装置と構成

合計 6 台の圧力計モジュールに対して、圧力天びんを利用して安定性と温度特性に関する室内実験を実施した (図 1)。室内実験で対象とした圧力計モジュールは、DONET の圧力計 (Paroscientific 社、8B7000-2-005) に組み込まれている圧力計モジュール (Paroscientific 社、410K-184) と同一である。したがって本報告書では、室内実験の圧力計モジュールも便宜上、圧力計と呼ぶことにする。3 台の圧力計には、圧力天びんから水深 1000 m に相当する 10 MPa を印加した。断面積約 10 mm² のピストン上に質量約 10 kg の重錘を搭載して、10 MPa の圧力を生成する。圧力計モジュールは 30 °C の恒温環境で使用されるため、実験でも 30 °C の恒温槽①内で連続印加を施していた。また別の 3 台の圧力計は、大気圧に開放している状態で、恒温槽②の温度を 20 °C ~ 2 °C の範囲で変化させて、温度特性に関する実験データを収録した。

(2) 海底現場観測データの解析

上記 (1) の室内実験中に発生した地震時に DONET の圧力計で記録した海底現場観測データの解析を行う。DONET の観測データを採用するのは、DONET では 2 種類の地震計、すなわち広帯域地震計と強震計が圧力計に併設されており、地動と水圧変動を同時に観測できているためである。

一方、室内実験の圧力計は海底現場の設置環境を再現しているため、地震時には圧力計が揺れて、その振動特性を記録することが期待される。したがって、室内実験で得られる圧力計の振動特性を考慮しながら、海底現場の水圧変動データを精査できることになる。

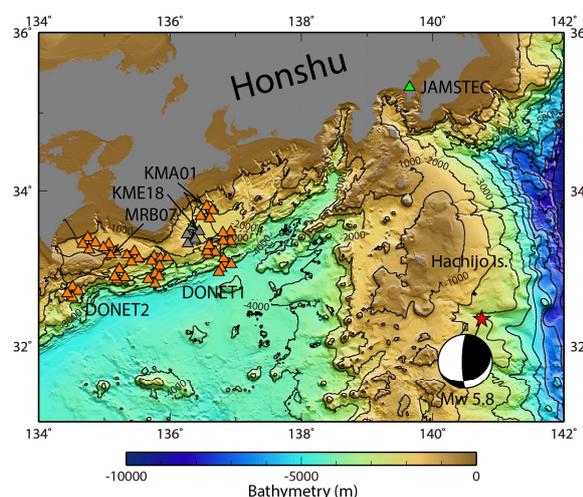


図-2 DONET 観測点と室内実験 (JAMSTEC) ならびに 2017 年 11 月 16 日に八丈島東方沖で発生した地震の位置

4. 研究成果

(1) 海底現場の圧力変動

室内実験中の 2017 年 11 月 16 日の 18 時 43 分頃に、八丈島東方沖を震源とするマグニチュード Mw5.8 の地震が発生した (図 2)。太平

洋プレート内部で発生した地震で、津波の観測報告はなかった。この地震ともない、南海トラフの DONET で運用中の 46 観測点 (図 2 のオレンジ色△印) の圧力計で水圧変動が観測された。図 3(a) は、DONET の圧力計で得られた水圧波形を震央距離の順に並べたものである。震央距離が 350 km から 430 km にあるものが DONET1、450 km から 600 km にあるものが DONET2 に属する観測点の水圧波形である。18 時 44 分頃から震央距離に対応して、順番に水圧変動が記録されている。スケールは波形間で統一しているので、大まかには震央距離に対応して、水圧変動の振幅は減衰していく。震央距離 450 km 以上の DONET2 の観測点で 18 時 48 分から 18 時 50 分にかけて

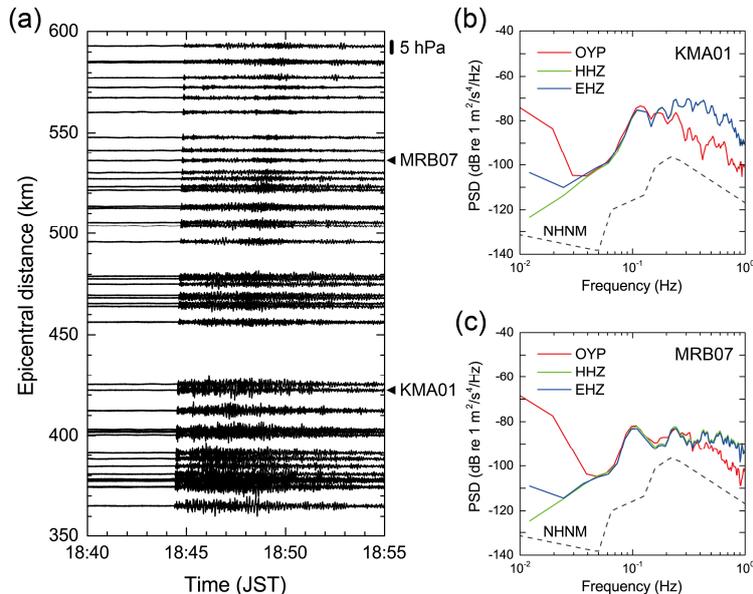


図-3 (a)地震時の DONET の圧力計の記録、(b)KMA01 ならびに(c)MRB07 のパワースペクトル密度の比較

明瞭に観測されている波形は、その位相速度から水中の SOFAR チャンネルを伝わる T 波である。

DONET では、広帯域地震計と強震計の 2 種類の地震計が圧力計と同じ観測点に設置されている。本研究の目的は、海底の圧力計が記録する水圧変動と地震動との関連性を検証することである。したがって、地震計と圧力計のスペクトルを比較する。地震波が到達する 18 時 44 分から 18 時 49 分までの 5 分間の地震計と圧力計のデータを解析する。海底面を水平と仮定すると、地動の水平成分の圧力変動への寄与は小さいので、地震計データの上下動成分だけを解析に用いる。

ここでは DONET の代表的な観測点として、KMA01 と MRB07 のデータ解析を実施する。KMA01 は水深 2039 m に設置された DONET1 の観測点、MRB07 は水深 1077 m に設置された DONET2 の観測点である (図 2)。KMA01 は DONET1 の典型的な設置水深であること、また MRB07 は室内実験で印加していた 10 MPa に最も近い設置水深であることから、この 2 観測点をデータ解析の対象とした。KMA01 と MRB07 の震央距離は、それぞれ 422 km と 535 km である (図 3(a))。

KMA01 と MRB07 の圧力計 (OYP)、広帯域地震計 (HHZ) ならびに強震計 (EHZ) のパワースペクトル密度 (PSD) をそれぞれ図 3(b) と図 3(c) に示す。各観測機器から出力される物理値は異なるので加速度に統一する。2 種類の地震計、すなわち広帯域地震計と強震計の PSD は一致する。圧力計と地震計の PSD の比較において特筆すべき特徴は、0.04 Hz 以上の周波数帯域で圧力計と地震計の PSD が一致することである。PSD の一致は、KMA01 では 0.2 Hz まで、MRB07 では 0.4 Hz まで見られる。圧力変動と地動が一致する周波数の上限は、水深で決まる水中音波の固有周波数に一致する。海底面を水中音波の完全反射境界と仮定すると、KMA01 と MRB07 の固有周波数は、それぞれ 0.18 Hz と 0.35 Hz となり、海底現場での観測値に一致する。このように地震時の海底の圧力変動が、地動の加速度成分に一致することが示された。しかしながら、ここまでの検証では、圧力計が地震動による内部の機械的振動応答を記録した可能性を排除できない。

(2) 室内実験による圧力変動

室内実験を実施していた場所は、図 2 に緑色△印で示す JAMSTEC (海洋研究開発機構) で、

震央距離は 345 km である。地震発生時に、圧力天びんに接続され重錘により 10 MPa を印加していた圧力計 3 台 (BPR01~BPR03) と大気圧に開放されていた圧力計 3 台 (BPR04~BPR06) の観測記録を図 4(a) に示す。圧力天びんに接続された圧力計には圧力変動が記録されているが、大気圧に開放された圧力計には圧力変動が記録されていない。実験室には広帯域地震計 (CMG-3TB) が設置されており、この地

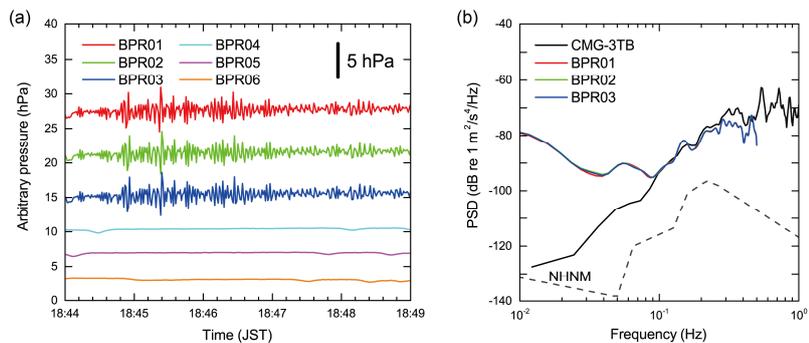


図-4 (a)圧力天びんから印加中の圧力計 (BPR01~BPR03) と大気圧に開放中の圧力計 (BPR04~BPR06) の記録、(b)広帯域地震計 (CMG-3TB) と BPR01~BPR03 のパワースペクトル密度の比較

震による地動を記録した。このことから、地震動が圧力天びんのピストン上の重錘を揺らし、圧力天びんに接続された圧力計が圧力変動を記録したと考えられる。一方、大気圧に開放していた圧力計は振動を記録しなかったことから、この地震動による圧力計内部の機械的振動は出力値に重畳されなかった。

実験室の広帯域地震計と圧力天びんで印加していた3台の圧力計のPSDを図4(b)に示す。ニュートンの第2法則にしたがって重錘の質量とピストンの断面積から、圧力計からのデータの単位を加速度に変換している。3台の圧力計が記録した圧力変動データには器差が観測されていない。図3(c)に示した水深1077mのMRB07(海底現場)の観測とほぼ同じ周波数帯域において、地動と圧力天びん(重錘)が生成する圧力変動のPSDが一致する特徴を実験で再現している。

このように地震時に圧力天びんの断面積10mm²のピストン上の質量10kgの重錘が振動して、水深1000mにおける圧力変動を再現した。このとき圧力計内部の機械的な振動を記録していないことから、圧力計が記録する大振幅の水圧変動は水塊に作用する地動の加速度と相関する海底現場の圧力と解釈できる。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計6件)

1. [Matsumoto, H.](#), [Kimura, T.](#), Nishida, S., Machida, Y., Araki, E., Experimental evidence characterizing pressure fluctuations at the seafloor-water interface induced by an earthquake, *Scientific Reports*, Vol.8, No.16406(2018), 2018, 査読有.
2. [Matsumoto, H.](#), Araki, E., Kawaguchi, K., Experimental evaluation of initial characteristics of DONET pressure sensors, *Marine Technology Society Journal*, Vol. 52, pp. 109-119, 2018, 査読有.
3. Nosov, M., Karpov, V., Kolesov, S., Sementsov, K., [Matsumoto, H.](#), Kaneda, Y., Relationship between pressure variations at the ocean bottom and the acceleration of its motion during a submarine earthquake, *Earth, Planets and Space*, Vol.70, doi:10.1186/s40623-018-0874-9, 2018, 査読有.
4. [Matsumoto, H.](#), Nosov, M. A., Kolesov, S. V., Kaneda, Y., Analysis of pressure and acceleration signals from the 2011 Tohoku earthquake observed by the DONET seafloor network, *Journal of Disaster Research*, Vol.12, pp.163-175, 2017, 査読有.
5. [Matsumoto, H.](#), Haralabus, G., Zampolli, M., Yamada, T., Prior, M. K., Analysis of T-phase and tsunami signals associated with the 2011 Tohoku earthquake acquired by CTBT water-column hydrophone triplets, *Journal of Japan Society of Civil Engineers (Coastal Engineering)*, Vol.72, pp. 337-342, 2016, 査読有.
6. [Matsumoto, H.](#), Haralabus, G., Zampolli, M., Özel, M. N., T-phase and tsunami pressure waveforms recorded by near-source IMS water-column hydrophone triplets during the 2015 Chile earthquake, *Geophysical Research Letters*, Vol. 43, pp. 12511-12519, 2016, 査読有.

[学会発表] (計10件)

1. [Matsumoto, H.](#), [Kimura, T.](#), Nishida, S., Machida, Y., Araki, E., Experimental challenges for interpretation of in-situ observation of bottom pressure recorders (BPRs) at the seafloor, *Japan Geoscience Union Meeting 2019*, 2019.
2. [Matsumoto, H.](#), [Ariyoshi, K.](#), Nagano, A., Hasegawa, T., In-Situ and experimental observations of bottom pressure recorders, *15th Annual Meeting Asia Oceania Geosciences Society*, 2018.
3. [Matsumoto, H.](#), Araki, E., Kawaguchi, K., Comparison of sensor's drift of pressure transducers by sensing mechanism, *OCEANS' 18 MTS/IEEE Kobe/Techno-Ocean 2018*, 2018.
4. [Matsumoto, H.](#), Haralabus, G., Zampolli, M., Özel, M. N., Hydroacoustic signals from tsunamigenic earthquakes acquired by CTBT IMS hydrophone triplets, *Japan Geoscience Union Meeting 2018*, 2018.
5. [Matsumoto, H.](#), Araki, E., Nishida, S., Machida, Y., [Kimura, T.](#), Demonstration of in-situ environment in laboratory - For precise observation by BPRs, *European Geosciences Union General Assembly 2018*, 2018.
6. [Matsumoto, H.](#), Haralabus, G., Zampolli, M., Özel, M. N., Data processing technique for T-phase and tsunami signals recorded by IMS hydrophone triplets, *CTBT: Science and Technology 2017*, 2017.
7. [Matsumoto, H.](#), Yokobiki, T., Choi, J. K., Araki, E., Kawaguchi, K., Takahashi, N., Kaneda, Y., Recent achievement of DONET seafloor observatory network, *International Hydroacoustic Workshop*, 2017.
8. [Matsumoto, H.](#), Seafloor observatory network using modular design architecture, *Regional Conference for States in the South East Asia, the Pacific and the Far East Region on CTBT*, 2017.

9. Matsumoto, H., Haralabus, G., Zampolli, M., Özel M. N., Yamada, T., Prior, M. K., T-phase and tsunami signals recorded by IMS hydrophone triplets during the 2011 Tohoku earthquake, American Geophysical Union Fall Meeting 2016, 2016.
10. Matsumoto, H., Haralabus, G., Zampolli, M., Yamada, T., Prior, M. K., Spatial anti-aliasing for T-phase directivity estimation using data from the International Monitoring System (IMS) hydroacoustic network of the Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization (CTBTO), European Geosciences Union General Assembly 2016, 2016.

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：木村 俊則

ローマ字氏名：KIMURA, Toshinori

所属研究機関名：国立研究開発法人海洋研究開発機構

部局名：地震津波海域観測研究開発センター

職名：技術研究員

研究者番号 (8 桁)：30520845

研究分担者氏名：有吉 慶介

ローマ字氏名：ARIYOSHI, Keisuke

所属研究機関名：国立研究開発法人海洋研究開発機構

部局名：地震津波海域観測研究開発センター

職名：研究員

研究者番号 (8 桁)：20436075

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。