

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 20 日現在

機関番号：82706

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25350501

研究課題名(和文) 震源近傍の水圧擾乱特性を考慮した津波即時予測の高度化

研究課題名(英文) Tsunami prediction considering dynamic pressure fluctuation in near source area

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) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、沖合に設置された水圧式津波計からのリアルタイム観測データを有効利用するために、観測データに適用するためのフィルタ設計、ならびに実際の観測データに基づく知見を整理した。本研究で設計したフィルタを2003年十勝沖地震のときに震源近傍で観測された水圧式津波計データに適用して、1分程度の遅延で津波を抽出できることを示した。また2011年東北地方太平洋沖地震のときに観測されたDONETデータについて精査した。水圧式津波計データを海底地震計データと併せて解析することにより、地震発生時の水圧擾乱を発生させる要因を分析した。

研究成果の概要(英文)：This study aims to make use of real-time data being sent from the ocean-bottom pressure sensors for effective tsunami forecasting. For this purpose, two major scopes are conducted in this study; one is to design digital filter to be applied to the real-time data acquired near tsunami source area, and one is to interpret the in-situ pressure data to enhance tsunami detectability. Applying the designed filter to the pressure data at the 2003 Tokachi-oki earthquake, it is validated that the tsunami signals could be extracted within approximately 1 min. Also, processing and analysis of pressure data acquired by DONET during the 2011 Tohoku earthquake show that the pressure disturbances during the earthquake are involved by the seismic and acoustic waves.

研究分野：地震工学

キーワード：津波 水圧式津波計 2003年十勝沖地震 2011年東北地方太平洋沖地震

1. 研究開始当初の背景

2011年東北地方太平洋沖地震(M9.0)がもたらした東日本大震災は、わが国の津波警報のいくつかの大きな課題を顕在化させ、その技術的改善や発表方法を見直すきっかけとなった。主要な課題の一つは、最初に発表した津波の高さの予測が実際の高さを大きく下回ったことが、避難の遅れにつながった例があったと考えられる点である。この改善策として、気象庁はこれまで津波発生の監視のみに利用してきた沖合の水圧式津波計の観測データを、2012年3月より津波警報の更新への活用を開始することにした。しかしながら、海底に設置した水圧式津波計には津波による水圧変動以外にも、地震動による擾乱、津波波源近傍では海底と海面間を共振する音響波などが含まれている。したがって簡便なフィルタ処理を適用してこれらを除去し、有意な変化として津波を識別したときは、経験的に倍率を設定して沿岸での高さを推定する。

そして、東日本大震災後に整備された南海トラフの「地震・津波観測監視システム(DONET)」や日本海溝の「日本海溝海底地震津波観測網(S-NET)」などの沖合津波観測ネットワークは、津波を事前に観測できる可能性が高いことから、適切に利用すれば津波防災・減災に資することが期待できる。しかしこれらの津波観測ネットワークで利用される水圧式津波計データは通常1~10Hzサンプリングであることから、とくに波源近傍では地震動等の津波以外の記録も含まれる。そのため、津波抽出の適切なデータ処理が不可欠となっている。また海底では、0.1Hz付近に脈動ノイズが定常的に卓越するため、この周波数帯域よりも長周期データを生成すれば、いわゆる「ゆっくり地震」のような長周期地殻変動の検出にも利用できることが期待される。

2. 研究の目的

上述の背景のもと本研究では、海洋研究開発機構(JAMSTEC)が設置・運用している海底観測ネットワークの水圧式津波計を利用した次の2つの主要な研究課題を設定した。

主要課題の一つは、水圧式津波計に適用する時間遅れを最小にするFIRデシメーションフィルタを設計することである。この課題では、震源近傍の津波観測を念頭に置き、津波波高に寄与する地殻変動量もリアルタイムに検出できる長周期データを生成する手法を開発することを目的としている。

もう一つの課題は、2011年東北地方太平洋沖地震の発生時の水圧式津波計データを海底地震計データとともに精査することである。これは、水圧式津波計を利用する津波予測の精度向上と適正化に資する知見の蓄積と適用性の実証を目的としている。

これらの研究課題は、東南海地震の想定震源域の地震と津波の観測監視強化のために、

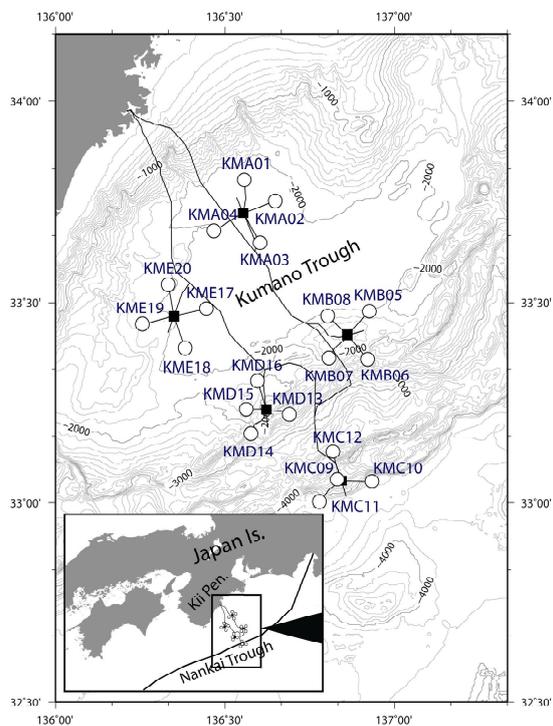


図-1 南海トラフの「地震・津波観測監視システム(DONET)」の観測点(白丸)

南海トラフに設置されたDONETの水圧式津波計データの有効利用に関連する課題でもある。海底地震計と水圧式津波計等から構成されるDONETは、合計20観測点を海底ケーブルでつなぎ、水圧式津波計からは水圧データがリアルタイムで配信されている(図-1)。本研究では、海底観測ネットワークのうち主に津波観測を目的として設置された水圧式津波計の海底設置前後の長期安定性評価を行い、高精度津波予測に資する基礎データとして理解する。

以上を要するに、本研究では沖合に設置された水圧式津波計を津波警報へ利用するためのリアルタイムデータ処理手法の開発とその検証、ならびにそれに資する地震動と水圧変動との関連性を明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 水圧式津波計のリアルタイムデータに適用するためのフィルタ設計

① デシメーションフィルタの設計

海底から伝送されるDONETの水圧式津波計のリアルタイムデータは10Hzサンプリングである。水圧式津波計データの主な利用目的は、最小mmオーダーまでのリアルタイム津波解析と長周期(0.001Hz以下)の地殻変動観測なので、最終生成データを0.1Hzサンプリングに設定した。そこで10Hzオリジナルデータから0.1Hzデシメーションデータを生成するために、1/100デシメーションフィルタを設計する。リアルタイム津波解析用データに要求される条件を次のように設定した。リアルタイム性を考慮し、概ね地震発生後1分

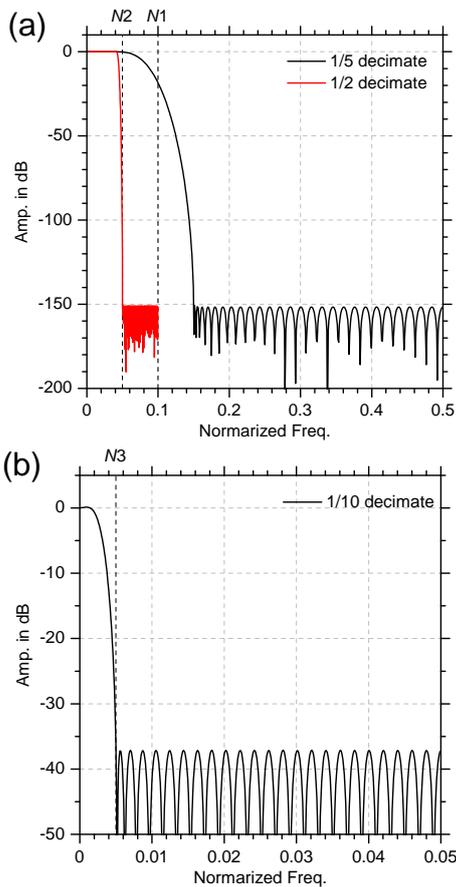


図-2 (a)1/5 および 1/2 デシメーション、
(b)1/10 デシメーションのフィルタ特性

程度以内にデシメーションが終了する。したがって総遅延量が概ね 1 分以内になることを目標とする。震源近傍で津波が伝播して抜ける過程を検知するため、通過周波数帯域を 0.016Hz(周期 1 分)程度以下とする。

地震計データのデシメーション処理のフィルタを 1/5、1/2、1/5、1/2 と 4 段階組み合わせれば、水圧計津波計データの 1/100 デシメーションの実装は可能である。しかしながら、デシメーションを進めるにつれてサンプリング間隔が長くなるため、リアルタイム性を重視する津波解析への群遅延量の影響を無視できないため、3 段階のデシメーションフィルタを適用する。すなわち、10Hz オリジナルデータを 1/5、1/2、1/10 の順にデシメートしていく。最初の 2 段階で、地震計データのデシメーション処理と同様に、1/5 デシメーションと 1/2 デシメーションを組み合わせ 1Hz データまでデシメートする。そして最後の 3 段階で、リアルタイム津波解析用に設計した 1/10 デシメーションを適用して、最終的に 0.1Hz サンプリングの長周期データを生成する。この 3 種類のフィルタの振幅特性を図-2 に示す。図-2(a)に示す第 1 段階と第 2 段階の 1/5 デシメーションと 1/2 デシメーションの振幅特性は地震計データの処理に適用しているものと同様である。図-2(a)に示した N1 と N2 はそれぞれのフィルタ適用

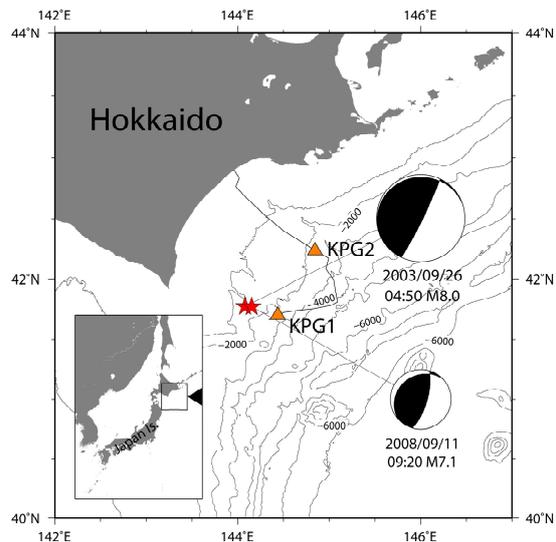


図-3 2003 年十勝沖地震(M8.0)と 2008 年の地震(M7.1)の震央と水圧式津波計(KPG1 と KPG2)の位置

後のナイキスト周波数を表している。ナイキスト周波数以上で 150dB 程度減衰させており高周波成分を効果的に除去できるように設計している。第 1 段階で 1/5 デシメーションフィルタを適用すると、ナイキスト周波数 N1 の折り返しでエイリアシングを起こす。しかしながら、第 2 段階で 1/2 デシメーションフィルタを適用すれば、ナイキスト折り返し部分は N2 以上の周波数帯域に含まれるため、その影響は除去できる設計としている。このように段階的なデシメーション過程で生成される中間生成データはロバスト処理する設計としている。第 2 段階の 1Hz データまでのデシメーションによる群遅延量(時間遅れ)は 39 秒となる。総遅延量を 1 分程度以内とするには、第 3 段階のデシメーションフィルタの時間遅れは 20 秒程度まで許容される。この条件を満たすため、フィルタ係数の次数を 51 次とし、津波成分を検出するため周波数 0.016Hz 以上(周期 1 分以下)を減衰させて、ナイキスト周波数 N3 以上で 40dB 減衰するデシメーションフィルタを設計した。第 3 段階の 1/10 デシメーションフィルタの振幅特性を図-2(b)に示す。このフィルタ特性に対応する群遅延量は 25 秒となっている。

②設計フィルタの適用性の検証

前項で設計したリアルタイム津波解析用のデシメーションフィルタについて、とくに津波波源の水圧式津波計データへの適用性を検証する。ここでは海底で運用されている水圧式津波計で取得された 10Hz サンプリングデータを利用する。津波波源の近傍で水圧計記録が得られた事例は少ない。本研究では、2003 年 9 月 26 日に発生した十勝沖地震(M8.0)ならびに 2008 年 9 月 11 日に十勝沖で発生した地震(M7.1)を対象とする(図-3)。地震の震央は 2 台の水圧式津波計 KPG1 と KPG2 の近傍にあり、KPG1 は波源内、KPG2 は波源からやや離れた海底に設置されている。

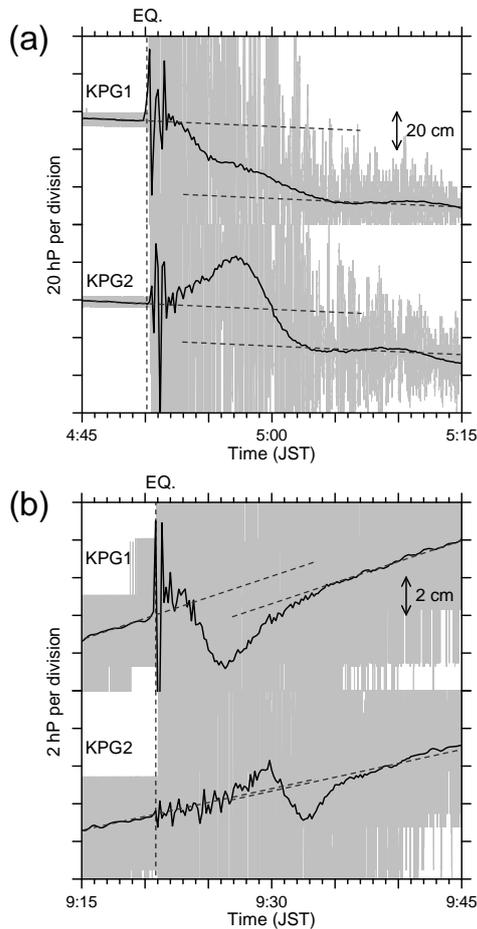


図-4 (a)2003年十勝沖地震、(b)2008年十勝沖で発生した地震のときの水圧式津波計のデシメーション波形

地震のときの水圧式津波計の観測波形と本研究で設計したデシメーションフィルタを適用した波形を比較したものを図-4に示す。図-4の点線は地震前後の基線で、潮汐成分による長周期の変動である。図-4(a)の2003年十勝沖地震の記録によれば、デシメーションした波形にも地震発生時には地震動による短周期の水圧変動が残っている。KPG1では地震発生直後から波源から津波が伝播して抜けるため単調な圧力低下が起きるのみである。一方KPG2では、津波の伝播に伴う水圧上昇が04時57分頃に観測され、その後津波の通過に伴い05時04分頃にかけて圧力低下が起こる。この過程で津波に起因する50cmの圧力差があったと推測される。またデシメーション波形から推定される地殻変動量は、KPG1で40cm程度、KPG2で20cm程度となり、Watanabeら(2004)の推定値とほぼ一致する。図-4(b)の2008年十勝沖で発生した地震のときの水圧変動は、2003年十勝沖地震のものと挙動が少し異なる。KPG1では地震発生直後からやや押し波があり、その後引き波に転じる。この引き波の原因は沈降域が海域にあるためである。09時26分頃に引き波ピークとなり、09時30分頃から徐々に平常時の水圧に戻る。ほぼ同じ波形がKPG2でも観

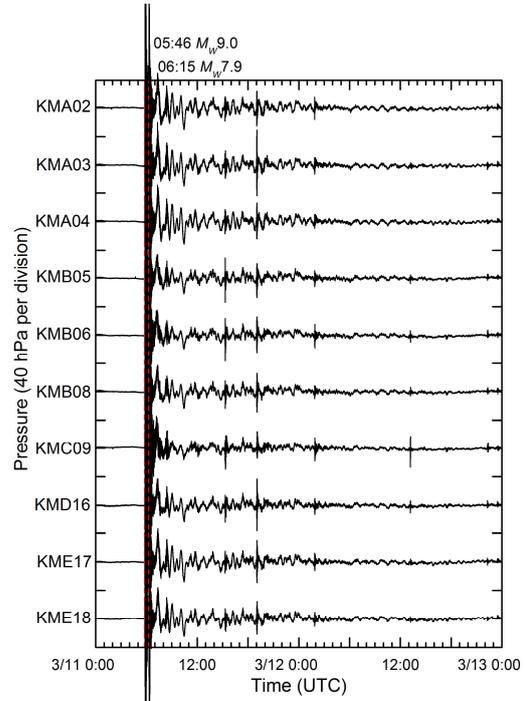


図-5 2011年東北地方太平洋沖地震のDONETの水圧式津波計の観測記録

測される。デシメーション波形から推定される地殻変動量はKPG1では1.5cm、KPG2では0.2cm以下となる。これは松本他(2009)の点震源から計算した地殻変動量に一致する。このように本研究で設計したデシメーションフィルタは、リアルタイムに津波や地殻変動を検出する最小位相を実現するFIRフィルタとなっていることを確認した。

(2) 地震発生時の水圧変動データ解析

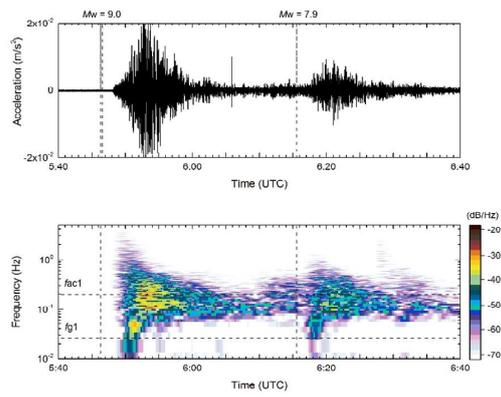
① データ解析の概要

2011年東北地方太平洋沖地震(M9.0)のときに、震源から約800km離れたDONETの10観測点で地震動と水圧の同時観測記録を残した(図-5)。DONETでは、05時46分(世界標準時)に発生した本震からの地震波が到達すると大震幅の水圧変動が観測される。本震の約30分後の06時15分(世界標準時)に発生した最大余震(M7.9)の記録もあわせて観測できている。DONETの水圧式津波計は海底地震計と同じ場所に設置されており、また海底地震計は垂直成分が調整されていることが特徴の一つである。DONETの観測記録は、これまで類似観測システムで観測されたデータと比べ格段に高精度・高品質な観測データとなっている。

② DONETのデータ解析

本研究では、DONETで観測した地震計データと水圧式津波計データを比較した。10観測点で取得した波形の特徴は、水深依存する詳細部分以外には観測点間で極めて類似しているため、ここでは代表観測点として設置水深1,924mのKMB08の地震計と水圧式津波計の地震発生を含む1時間の観測波形ならびにそれらのスペクトログラムを図-6に示す。津波の到達は図-6の表示範囲よりも後の時間

(a) OBS KMB08



(b) PG KMB08

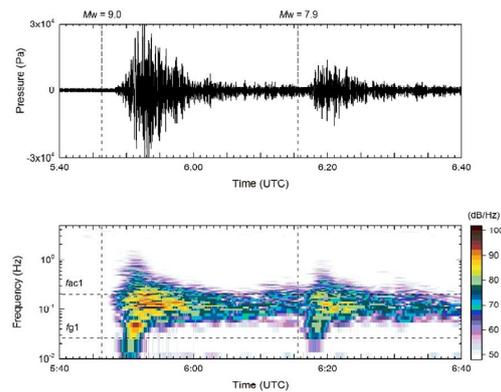


図-6 (a) KMB08 の地震計データとスペクトログラム、(b) KMB08 の水圧式津波計データとスペクトログラム

になる。図-6 のデータ解析結果が示唆する特徴は次の通りである。(i) 地動と水圧変動のスペクトログラムを比較すると、両者は 0.01 ~ 1 Hz で類似している。しかしながらそれ以外の周波数帯域では地動は必ずしも同レベルの水圧変動を誘発していない。(ii) 震源から伝播する地震波のうち、DONET にも S 波が到達しているはずであるが、明瞭にはその到達は識別できない。これは類似の観測システムによる 2010 年チリ地震の報告 (Rabinovich, 2013) とは異なる点である。(iii) 分散性を有する Rayleigh 波は、本震ならびに、その直後の最大余震のときも地震計でも水圧式津波計でも明瞭に観測されている。

次に、地震計データを水圧値に換算 (Webb, 1998) して、スペクトル解析を実施した。パワースペクトル密度 (PSD) で両者のスペクトルを比較したものを図-7 に示す。図-7 には、観測装置の設置水深に対応する音響波の共振周波数 f_{ac1} と表面重力波の限界周波数 f_{g1} を示している。なお f_{g2} は波動の水圧が静水圧とみなせる周波数を示している。 f_{ac1} よりも高周波帯域では、理論的には水深に依存する固有周波数で音響共振を起こす。図-7 の高周波帯域のスペクトルが卓越する周波数では音響共振が発生する。そして中間周波帯域、すなわち f_{g1} と f_{ac1} に挟まれる周波帯域では、圧力変動の振幅は海底の加速度と一致し

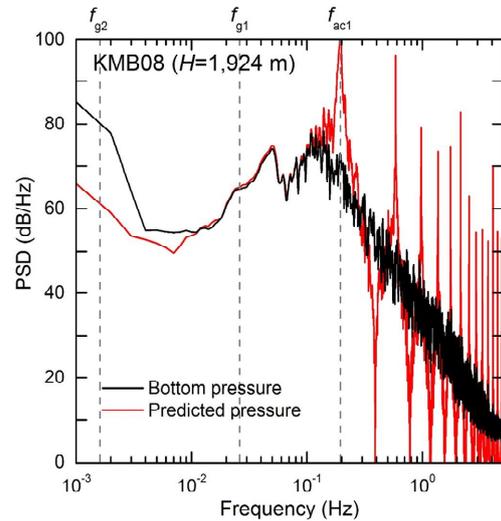


図-7 KMB08 の水圧式津波計データと水圧換算した地震計データのパワースペクトル密度 (PSD)

ている。一方、 f_{g1} よりも低周波帯域では圧力変動は海底振動からは独立しているように見える。すなわち水圧変動には、水中音圧、動水圧、静水圧の 3 種類の水圧変動が含まれ、低周波成分から津波成分が、高周波成分から音圧成分が、中間周波成分から動水圧成分がそれぞれ抽出できることを意味する。

4. 研究成果

リアルタイム津波解析を主眼に置き、水圧式津波計の 10Hz データから 0.1Hz データを生成する過程で、津波と地殻変動検出に適したデシメーションフィルタを設計した。3 段階のデシメーションフィルタを適用することとして、最初の 2 段階は地震計データと共通とし、3 段目のフィルタはリアルタイム性を重視して設計した。本研究で設計したデシメーションフィルタの総群遅延量は 1 分程度であり、リアルタイム性を重視する沖合の水圧式津波計への適用は可能と考えられる。

本研究で設計したデシメーションフィルタを 2003 年十勝沖地震と 2008 年に十勝沖で発生した地震の津波波源の水圧式津波計データに適用した。その結果、震源近傍において津波が伝播する過程と地殻変動量を検出でき、本研究で設計したデシメーションフィルタがリアルタイムに津波と地殻変動を抽出できるものとなっていることを検証した。

2011 年東北地方太平洋沖地震のときの DONET で観測されたデータ解析では、地動が水中に発生させる波動には周波数依存があり、低周波から高周波へ移行するにつれて、重力波 (津波)、動水圧、水中音波の 3 種類の波動が生成されることを示した。従来は津波成分だけが注目されることが多かったが、実際には 3 種類の水圧成分が存在し、観測記録から長周期成分を抽出すれば津波波形が、短周期成分を抽出すれば音圧 (海震) 成分が検出できる。動水圧成分は地動の加速度成分に一致することが理論的には知られてい

たが、これまで検証することができなかった。DONET の水圧と地動の同時観測記録によりこれらが実現象として確認された。

上記の特性は、リアルタイム津波予測技術の高度化の一環として沖合の水圧式津波計を利用する際の知見として重要な点であると考えられる。

<参考文献>

Rabinovich, A. B., Thomson, R. E., and Fine, I. V., The 2010 Chilean tsunami off the west coast of Canada and the northwest coast of United States, *Pure Appl. Geophys.*, 170, 1529-1565, 2013.

Webb, S. C., Broadband seismology and noise under the ocean, *Rev. Geophys.*, 36(1), 105-142, 1998.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計4件)

- ① Ariyoshi, K., Nagano, A., Hasegawa, T., Kido, M., Nakata, R., Matsumoto, H., Uchida, N., and Igarashi, T., A trial extraction of crustal deformation from seafloor hydraulic pressure gauges to estimate interpolate coupling for subduction plate boundaries, Proc. 12th SEGJ Int' l Symposium, doi:10.1190/segj122015-079, 2015, 査読有.
- ② 有吉 慶介、永野 憲、松本 浩幸、長谷川 拓也、巨大地震震源域の特定に向けた海底観測網の新たな活用、海洋理工学会誌、21(2)、7-15、2015、査読有.
- ③ 松本 浩幸、荒木 英一郎、水圧計のリアルタイムデータに適用するためのフィルタ設計、土木学会論文集B2(海岸工学)、70、361-365、2014、査読有.
- ④ Matsumoto, H. and Kaneda, Y., Some features of bottom pressure records at the 2011 Tohoku earthquake - Interpretation of the far-field DONET data, Proc. 11th SEGJ Int' l Symposium, doi:10.1190/segj112013-124, 2013, 査読有.

[学会発表] (計5件)

- ① 林 豊、沖合と海岸の観測点での津波高の経験的關係の更新、日本地球惑星科学連合 2016 年大会、2016/5/25、幕張メッセ国際会議場、千葉県千葉市.
- ② Matsumoto, H., Araki, E., Kawaguchi, K., Ariyoshi, K., Long-term drift characteristics of ocean-bottom pressure sensors of DONET, 26th IUGG General Assembly, 2015/06/29, Prague, Czech Republic.
- ③ Matsumoto, H., Nosov, M., Kolesov, S., Kaneda, Y., Sementsov, K., and Bolshakova, A., Observation of the 2011 Tohoku earthquake and tsunami

with use of the DONET stations, EGU General Assembly 2015, 2015/04/16, Vienna, Austria.

- ④ Matsumoto, H., Kaneda, Y., Nosov, M., and Kolesov, S., Ocean-bottom pressure and seismic signals at tsunamigenic earthquake, Underwater Technology 2015, 2015/02/23, Chennai, India.
- ⑤ Matsumoto, H., Nosov, M., Kolesov, S., Inoue, S., and Kaneda, Y., Contribution of seismic oscillation to ocean-bottom pressure records at the 2011 Tohoku earthquake, 26th Int' l Tsunami Symposium, 2013/09/27, Gocek, Turkey.

[図書] (計1件)

- ① 東日本大震災合同調査報告書編集委員会 (松本 浩幸、河合 弘泰、林 豊分担執筆)、丸善出版、東日本大震災合同調査報告 共通編2 津波の特性と被害、271(40-69)、2014.

6. 研究組織

(1) 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

(2) 研究分担者

林 豊 (HAYASHI, Yutaka)

気象庁気象研究所・地震津波研究部・主任研究官

研究者番号：40370332

堀 高峰 (HORI, Takane)

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・グループリーダー

研究者番号：00359176

有吉 慶介 (ARIYOSHI, Keisuke)

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：20436075

山崎 明 (YAMAZAKI, Akira)

気象庁気象研究所・地震火山研究部・主任研究官

研究者番号：70354529

金田 義行 (KANEDA, Yoshiyuki)

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・招聘上席技術研究員

研究者番号：50359171