

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28日現在

機関番号：82706

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22710175

研究課題名（和文）南海トラフ沿いで発生する津波の即時予測技術の高度化

研究課題名（英文）Advances of real-time tsunami detection by ocean-bottom pressure gauges

研究代表者

松本 浩幸（MATSUMOTO HIROYUKI）

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・技術研究副主任

研究者番号：80360759

研究成果の概要（和文）：本研究では、沖合の深海底に設置された水圧式津波計からのリアルタイムデータを有効利用するため、観測データに基づく知見を整理した。水圧式津波計について、海底設置前に実施した室内実験ならびに現場観測による長期安定性評価の結果、室内実験で確認されたドリフトは、海底設置後も継続して観測されることが分かった。また2011年東北地方太平洋沖地震（M9.0）ならびに三陸沖で発生した地震（M6.9）による津波について、水圧式津波計データを近傍の海底地震計データと併せて精査した。水圧式津波計に含まれる擾乱を発生させる要因を分析し、震源近傍でも適切なフィルタを適用すれば津波を抽出できることを示した。

研究成果の概要（英文）：This study aims to evolve our knowledge on the bottom pressure observed during the tsunamigenic earthquakes. At first, we evaluated the long-term sensor stability both by the laboratory experiment and the in-situ observations. And we interpreted the water pressure disturbances during the 2011 Tohoku earthquake and the following moderate-to-large aftershock by means of the time-frequency processing analysis with the ocean-bottom seismometers. As a result, the bottom pressure disturbances during the earthquake are dominated by the ocean-bottom acceleration and velocity for the intermediate frequency range and the high frequency range, respectively. In the low frequency range, on the other hand, water pressure amplitude is isolated on the bottom oscillations, suggesting that tsunami signals can be detected by using its threshold.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
2012年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：社会・安全システム科学、自然災害科学

キーワード：津波、地震動、海底地震計、水圧式津波計、津波警報システム、東日本大震災

1. 研究開始当初の背景

2004年12月に発生したインド洋大津波は、津波警報システムの未整備地域を中心に未

曾有の津波災害をもたらし、グローバルな津波早期警報システム構築のきっかけとなった。津波早期警報システムを実現するファシ

リティの一つが沖合津波観測システムである。米国では、2001年に海洋大気局(NOAA)が環太平洋にDART(Deep-ocean Assessment and Reporting of Tsunami)ブイを設置して、海底の水圧観測により津波を早期検知する体制を整備して以来、現在までにインド洋にも同様のシステムが展開されている。

一方、日本では海溝型巨大地震発生帯に海底ケーブル式津波計やGPS波浪計が整備されつつある。津波の沖合観測は、1978年に御前崎沖で開始されて以来、日本の周辺海域に広がっている。

そして2004年紀伊半島沖で発生した地震(M7.4)や2006年千島列島沖地震(M8.3)では、沿岸到達の約20分前に津波を観測することに成功し、津波の早期検知の進展がみられた(Matsumoto and Kaneda, 2009など)。今や国内外を問わず、津波の早期警報システムの構築に注目が集まっている。そしてわが国がイニシアティブをとり、沖合観測システムを津波予警報に積極的に利用するべきであるという着想に至った。

巨大地震による津波を早期検知して、さらに観測データを津波予警報に有効利用するためには、想定シナリオに基づく観測技術やノウハウを培っておく必要がある。これが本研究の強い動機づけとなっている。本研究では津波の即時予測を念頭に置き、沖合の観測データを津波警報システムに利用することを目指している。そのためには沖合の津波観測点における観測水圧データの高精度予測と津波の早期検知に資する観測指標が不可欠である。

2. 研究の目的

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、海底地震計と水圧式津波計等から構成される「地震・津波観測監視システム」が熊野灘に設置された。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。

また沖合の水圧式津波計は観測地点の水圧変化を計測して、海面の波高に換算する方式をとっている。しかしながら、津波波源近傍では地震動による水圧擾乱が大きく、リアルタイムで津波波高を直接的に計測することは困難である。事前に予測された地震動-水圧変動から津波波高を引き出すことができれば、この問題点を回避できる。したがって本研究では、津波波源近傍の観測データに基づく津波情報を短時間に発信できる観測

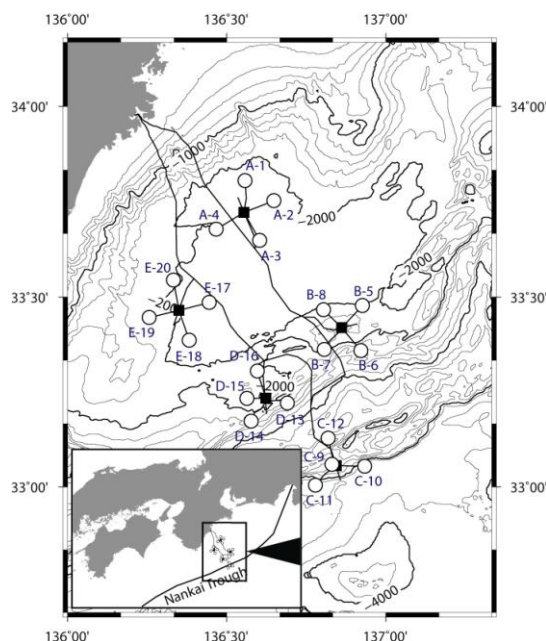


図-1 熊野灘「地震・津波観測監視システム」の津波観測点(白丸)

指標を模索する。

さらに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発表方法を見直すきっかけとなった。その一環で2012年3月より気象庁は、沖合の水圧式津波計の観測データを津波警報へ活用することを開始した。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。本研究では、水圧式津波計データ活用の最初の事例となった2012年3月14日に三陸沖で発生した地震(M6.9)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して、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も重要である。

以上を要するに、本研究では水圧式津波計の長期安定性評価と津波早期検知の検証、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) 水圧式津波計の長期安定性評価

水圧式津波計は経年とともにドリフト変化する事が知られている。高精度の津波観測を実現するために、水圧計を海底に設置する前に温度一定の環境下で加圧する室内実験を実施した。試験では海底観測ネットワークの設置環境と同等となるよう、海洋研究開発機構が所有する海底孔内温度圧力シミュ

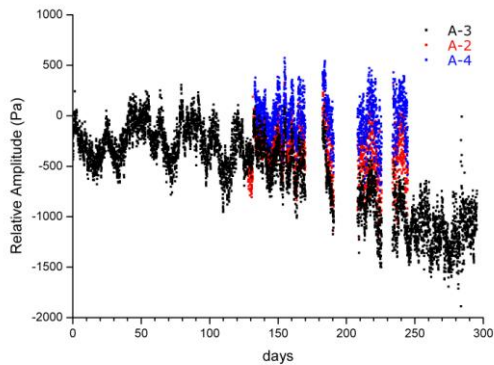


図-2 観測データと予測潮汐との残差

レータを利用した。この環境シミュレータは、高精度圧力発生装置と恒温装置から構成され、 2°C 一定の環境下で水深 2,000m に相当する圧力 (20MPa) を水圧式津波計に連続印加することができる。印加期間は約 1 ヶ月間とした。大気圧計測も同時に実施して、大気圧変化の寄与を考慮してドリフト変化量を補正した。約 1 ヶ月の印加でセンサー間に器差はあるが、最大 20hPa (20cm 水頭に相当) のドリフト変化量が計測された。このドリフト変化の経過は、時間経過とともに指数関数的小さくなる傾向を示した。これは海底設置後に観測されるドリフト量に関する既往の研究と調和的である。最初に構築した観測点は、2010 年 3 月に設置した A-3 観測点である。津波に加えて地殻変動量を検知するため、潮汐成分を除去するために数ヶ月分の観測データに調和解析を施した。そして分潮係数を算出して、リアルタイムで潮汐成分を除去するモジュールを実装した。設置後の観測期間が最長の A-3 観測点について、データ蓄積が可能となった 2010 年 6 月から 2011 年 3 月までの観測記録と潮汐成分との残差を示したものが図-2 である。2010 年 10 月には近傍の A-2 観測点と A-4 観測点を構築してデータ配信が開始されたので、相互比較のために A-3 観測点に加えて A-2 観測点と A-4 観測点について同様の処理を施したものについても図-2 にプロットして示す。短周期成分が残っているが、海底設置後に 10hPa (10cm 水頭に相当) のドリフト変化が見られる。

(2) 東北地方太平洋沖地震時の水圧観測

観測点構築後に津波を発生させた地震のうち 2011 年東北地方太平洋沖地震 (M9.0) にもともなう津波観測について報告する。地震発生当時、海底観測ネットワークの 10 観測点が設置済みであった。一例として、図-3 に C-9 観測点と E-17 観測点の水圧計データを示

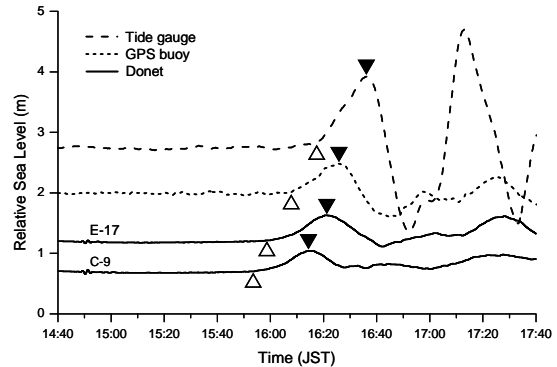


図-3 2011 年東北地方太平洋沖地震による津波観測記録

す。また海底観測ネットワークの陸上局に近い GPS 波浪計と検潮所の潮位データを併せて示す。図中の Δ は津波の第一波の到達 (立ち上がり)、 \blacktriangledown は第一波の最大波高を示す。海底観測ネットワークの観測点では 15 時 50 分ごろに津波が到達して、約 20 分後に 0.3m 程度の最大波高を示していることが分かる。その後、津波は波高を増大させながら紀伊半島沿岸に到達していくことが、GPS 波浪計と検潮所の潮位データから読みとれる。この結果、従来からの沿岸の津波観測点に加えて、沖合の津波観測ネットワークが津波早期検知に寄与することが期待される。

(3) 水圧変動と地震動との関連性

本研究では、水圧式津波計データ活用の最初の事例となった 2012 年 3 月 14 日に三陸沖で発生した地震 (M6.9) 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した。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を目的とするためである。

ここで対象とする観測機器は、北海道釧路沖で運用されている海底ネットワークである。図-4 に水圧式津波計 PG1 と PG2、また津波計から約 5km 離れたところにある海底地震計 OBS1 と OBS3 の設置位置を示す。ここで対象とする地震は太平洋プレート内で起きた正断層メカニズムのアウトターライズ地震であった。震央と観測点との距離は約 130km ある (図-4)。10Hz サンプルのオリジナル水圧データに対して地震発生を含む 1 時間のデータを抽出し、ランニングスペクトル解析を行った。図-5 に、地震発生を含む 18 時 00 分 ~ 19 時 00 分までの PG1 と PG2 の水圧観測波形ならびにランニングスペクトルを示す。ランニングスペクトルは、最大値で正規化したものを対数表示させており、PG1 と PG2 でスケールが異なっていることに注意されたい。ランニングスペクトルの破線は、音響波が海

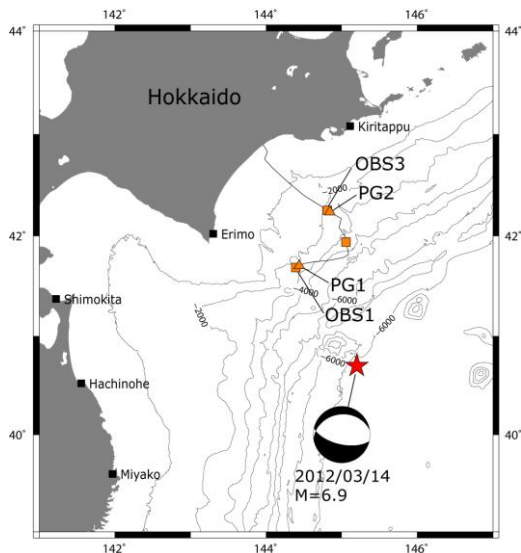


図-4 2012年3月14日の三陸沖地震と近傍の海底観測ネットワークの観測点

底と海面との間で共振振動する固有周波数 f_1 で、水深のみで決まる。PG は水深約 2, 200m の海底に設置しているため、固有周波数 f_1 は 0.17Hz となる。

18時08分頃の地震の発生と同時に、地震波により低周波から高周波までの広帯域の水圧変動が励起される。特徴的な現象は、地震波による水圧変動はすぐに減衰するにもかかわらず、地震が終了しても狭い周波数帯域に限定して水圧変動が50分以上継続していることである。これは海底と海面との間で共振する音響波と考えられる。しかしながら、実際には音響波の共振周波数 f_1 よりも低周波側に卓越周期がある。これは海底が表層堆積物に覆われているために、実際の音響基底が海底面よりさらに深いところあるためと考えられる。

PG1では18時15分頃から、PG2では18時20分頃から0.01Hz以下の低周波帯域に卓越する水圧変動がある。これが三陸沖で発生した津波である。またランニングスペクトルから、この津波は分散性を示していることが読みとれる。

図-5の水圧観測波形からは、直接的に津波成分は検出できない。これはPG1とPG2が震源に比較的近いことで、津波が到達するときには地震波や共振音響波の影響が津波にともなう水圧変動に重畳されているため、水圧変動が小さい津波の検知は困難なことを示唆する。従って、沖合の水圧式津波計を津波警報にリアルタイムに利用するためには、何らかのフィルタを設計して津波成分を抽出

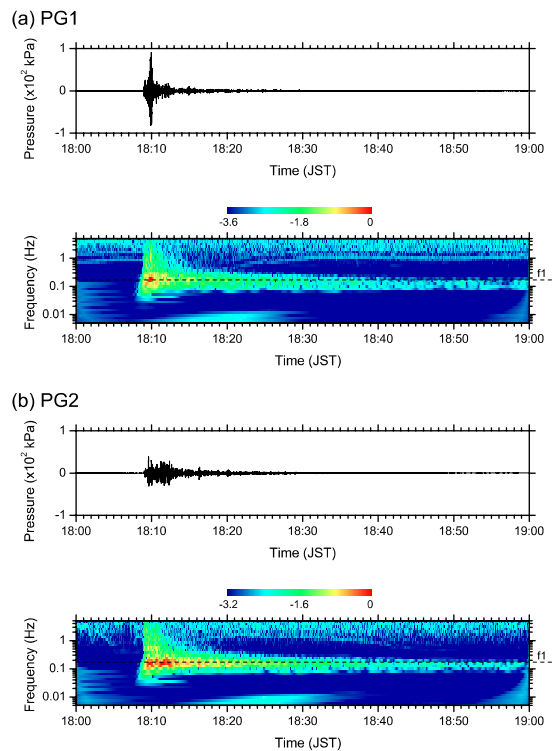


図-5 水圧式津波計(a)PG1と(b)PG2で観測された水圧変動とランニングスペクトル

出する必要がある。そこで本研究では、地震時の水圧擾乱が地震波と音響波であることから近傍の海底地震計の観測データを利用して水圧変動を説明できるか検証する。

ここでは、PG1とPG2の近傍の海底地震計データから水圧変換データを作成してフーリエスペクトルを求めて、海底津波計のフーリエスペクトルと比較した。

海底津波計PG1と近傍の海底地震計OBS1を水圧値に変換したフーリエスペクトルの比較を図-6に示す。図-6には、海底津波計の設置水深に対応する音響波の共振周波数 f_1 と浅海波の限界周波数 f_s を示している。 f_1 よりも高周波帯域では、水圧変動の振幅は海底の速度と一致している。そして中間周波帯域、すなわち f_s と f_1 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ている。一方、 f_s 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。

津波は、一般的に浅海波とみなされることから、上記の水圧特性の区分から、浅海波の

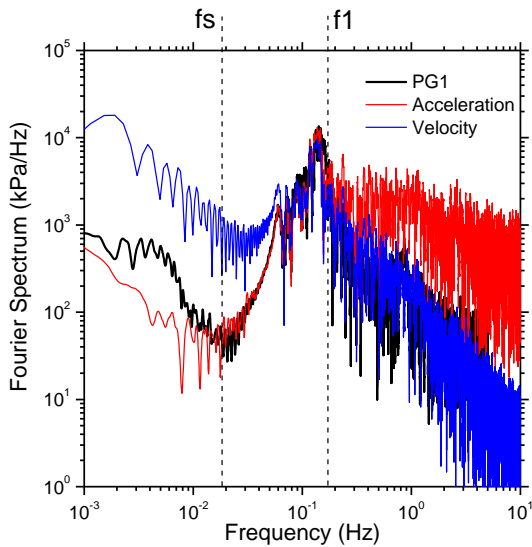


図-6 海底津波計 PG1 と近傍の海底地震計 OBS1 の観測データのフーリエスペクトル

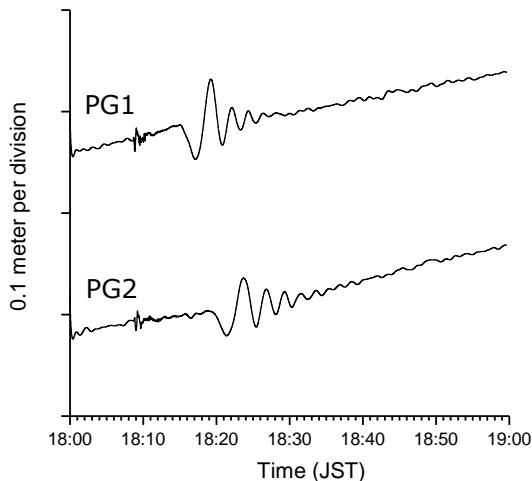


図-7 カットオフ周波数 f_s のローパスフィルタを適用した水圧式津波計の観測データ

限界周波数 f_s を利用して津波成分を抽出することを試みる。PG が設置されている水深 2, 200m における f_s は 0.019Hz と導出できる。したがって、観測された海底津波計の水圧波形データにカットオフ周波数 f_s の 4 次のバターワースローパスフィルタを適用した。その結果を図-7 に示す。

図-7 によれば、観測データに潮汐成分は残っているものの、PG1 では 18 時 15 分に、PG2 では 18 時 20 分に、それぞれ津波成分が明瞭に抽出されている。今回の地震が正断層型の震源メカニズムであったことを反映して、津波は大きく引き波から始まり押し波となる、その大きさは両振幅で約 8cm となっている。

4. 研究成果

熊野灘の海底観測ネットワークに採用される水晶水圧計について室内実験により長期安定性評価を実施した。予測によればドリフト量は、最大 20hPa/月程度である。海底設置後もドリフトは継続していることを確認した。熊野灘の海底ネットワークの水圧計でも東北地方太平洋沖地震の津波を観測した。沖合津波観測としては、これまでの観測値の最大の周期と振幅となっている。

海底観測ネットワーク近傍で発生した地震津波に対して、水圧式津波計のデータを精査した。海底地震計と比較したところ、観測される水圧擾乱の主要成分は地動の加速度成分に起因することが分かった。これは卓越成分が音響波だった直近で発生した 2003 年十勝沖地震とは異なる。近年設置されている類似の海底観測ネットワークでは、海底地震計と海底津波計は同一地点に設置されている。水圧式津波計で観測される水圧擾乱の卓越成分は地動に起因するので、地震計データを水圧値に変換して利用すれば、観測データに含まれる水圧擾乱をリアルタイムで除去できる可能性がある。水圧擾乱の特性を考慮したフィルタを適用して、水圧式津波計により数 cm 程度の微小な津波を抽出できれば、気象庁における沖合の水圧式津波計の観測データを活用した津波警報・注意報の更新作業の信頼性を高めることができるだろう。

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 9 件)

① Matsumoto, H., Araki, E., Nishida, S., Kawaguchi, K., and Kaneda, Y., Some characteristics of bottom pressure sensors of DONET, Proc. Underwater Tech. 2013, 2013, 査読無.

② Matsumoto, H., Inoue, S., and Ohmachi, T., Dynamic response of bottom water pressure due to the 2011 Tohoku earthquake, J. Disaster Res., 7, 468-475, 2012, 査読有.

③ 松本浩幸, 林豊, 金田義行, 海底津波計のリアルタイム観測データに含まれる水圧擾乱の特性, 土木学会論文集, B2-68 (海岸工学), 391-395, 2012, 査読有.

④ Matsumoto, H., T. Baba, K. Kashiwase, T. Misu, and Y. Kaneda, Discovery of submarine landslide evidence due to the 2009 Suruga Bay earthquake, Submarine Mass Movements and Their Consequences, Yamada

et al. (eds.), *Advances in Natural and Technological Hazards Research*, 31, 549-550, 2011, 査読無.

⑤松本浩幸、荒木英一郎、川口勝義、金田義行、「地震・津波観測監視システム」の水圧計データの特性、土木学会論文集、B2-67、286-290、2011、査読有。

⑥ Matsumoto, H., *Advances of tsunami measurement technologies and its applications*, *Tsunami-A Growing Disaster*, M. Mokhtari (ed.), ISBN 978-953-307-431-3, 2011, 査読有。

⑦Baba, T., H. Matsumoto, K. Kashiwase, T. Hyakudome, Y. Kaneda, and M. Sano, *Micro-bathymetric evidence for the effect of submarine mass movement on tsunami generation during the 2009 Suruba Bay earthquake, Japan, Submarine Mass Movements and Their Consequences*, Yamada et al. (eds.), *Advances in Natural and Technological Hazards Research*, 31, 507-516, 2011, 査読有。

⑧Bolshakova, A., S. Inoue, S. Kolesov, H. Matsumoto, M. Nosov, and T. Ohmachi, *Hydroacoustic effects in the 2003 Tokachi-oki tsunami source*, *Russ. J. Earth. Sci.*, 12, ES2005, doi:10.2205/2011ES000509, 2011, 査読有。

⑨松本浩幸、馬場俊孝、柏瀬憲彦、金田義行、三須敏郎、堀哲郎、2009年8月11日に駿河湾で発生した地震による深層水取水管の被災とその要因、土木学会論文集 B2、66、1341-1345、2010、査読有。

〔学会発表〕(計8件)

①松本浩幸、西田周平、荒木英一郎、川口勝義、金田義行、DONET 観測点構築のための海底地質調査と評価、ブルーアース 2013、東京、2013. 3. 6.

②松本浩幸、林豊、金田義行、海底津波計のリアルタイム観測データに含まれる水圧擾乱の特性、第59回海岸工学講演会、広島市、2012. 11. 16.

③Matsumoto, H., Ohmachi, T., and Inoue, S., *Interpretations of water pressure response during the 2011 Tohoku earthquake*, *EGU General Assembly 2012*, Vienna, Austria, 2012. 4. 26.

④松本浩幸、荒木英一郎、川口勝義、金田義行、「地震・津波観測監視システム」の水圧計データの特性、第58回海岸工学講演会、盛岡市、2011. 11. 11.

⑤松本浩幸、荒木英一郎、川口勝義、中村武史、金田義行、「地震・津波観測監視システム(DONET)」の海底津波計データについて、日本地球惑星連合大会 2011、千葉市、2011. 5. 22.

⑥Matsumoto, H., Baba, T., and Kaneda, Y., *Evidence of submarine landslide triggered by the 2009 Suruga Bay, Japan earthquake*, *EGU General Assembly 2011*, Vienna, Austria, 2011. 4. 8.

⑦松本浩幸、馬場俊孝、柏瀬憲彦、金田義行、三須敏郎、堀哲郎、2009年8月11日に駿河湾で発生した地震による深層水取水管の被災とその要因、第57回海岸工学講演会、京都市、2010. 11. 11.

⑧Matsumoto, H. and Kaneda, Y., *Recent progress on early tsunami detection by offshore observatory* *EGU General Assembly 2010*, Vienna, Austria, 2010. 5. 6.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松本 浩幸 (MATSUMOTO HIROYUKI)
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・技術研究副主任
研究者番号：80360759

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし