

令和 5 年 6 月 20 日現在

機関番号：82706

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02411

研究課題名(和文) 海底圧力計で微小地殻変動を計測するためのドリフト特性に関する検証実験

研究課題名(英文) Experimental evidence characterizing pressure sensors' drift at the seafloor

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・海域地震火山部門(地震津波予測研究開発センター)・主任研究員

研究者番号：80360759

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、海底圧力計のドリフトを室内実験で評価した。高精度圧力を発生できる重錘形圧力天びんから圧力計に加圧して、計測されるドリフトを評価した。

実験では、海底観測ネットワークの海底圧力計で採用される水晶振動式圧力計に加え、主に工業分野で採用されるシリコン振動式圧力計を計測した。両圧力計ともドリフトは、緩和係数と線形係数を組み合わせてモデル化できた。シールドゲージ圧タイプのシリコン振動式圧力計は、水晶振動式圧力計と同等のドリフトであった。

さらに両者の動圧に対する応答特性についても考察した。シリコン振動式圧力計は、津波を観測するには大差はないが、短周期の動圧には応答特性があることを示唆した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

重錘形圧力天びんから圧力計に連続加圧することで、室内実験でドリフトを再現できたことは、海底設置前にドリフトを評価しモデル化する手法として適用できる。

また将来の海底観測ネットワークで設置されるタイプと同様の圧力計のドリフトを評価することにより海底設置後の安定性を事前に理解することができたので、データ利用の高度化への意義が大きい。

海底圧力計のドリフトを予測して、地震発生帯での広域の海底地殻変動を観測できれば、巨大地震発生までの準備過程が明らかとなり、地震予測の精度向上につながる。

研究成果の概要(英文)：The sensor drift observed with in-situ ocean-bottom pressure gauges has been evaluated in a laboratory experiment. A pressure balance was used to apply highly-accurate pressure to the these gauges.

A silicon resonant pressure gauge, mainly used in industry, was evaluated in addition to a quartz resonant pressure gauge used in the seafloor observatories. For both pressure gauges, drift could be modelled by a function combining relaxation and linear coefficients. The drift of some of the silicon resonant pressure gauges was comparable to that of the quartz resonant pressure gauge. The frequency response to dynamic pressure for both pressure gauges was also discussed: the silicon resonant pressure gauge seems to be less sensitive to short period pressure fluctuations than the quartz resonant pressure gauge, but no difference between the two kinds of pressure gauges was observed for long period pressure fluctuations such those produced by the passage of tsunamis.

研究分野：地震工学

キーワード：圧力計 ドリフト 重錘形圧力天びん 地震

1. 研究開始当初の背景

海底津波計(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。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)」で採用されている圧力計は水深変化を高分解能で計測できることから、巨大地震発生に至る準備過程で発生する鉛直方向の地殻変動を計測できることが期待されている。

しかしながら、圧力計にはドリフト(校正値の経時変化)が発生することが知られており、海底観測によればその量は1ヶ月あたり1hPa程度(水深に換算すると1cm程度に相当)になる機器もある。このように、圧力計に重畳されるドリフトが予測される定常的な地殻変動量よりも大きくなる場合があり、ドリフトによる誤差が地殻変動観測の実用化へ向けてのボトルネックとなっている。

2. 研究の目的

DONETの圧力計の長期観測データを精査すると、海底設置後から観測データにドリフトが重畳されることが判明している。例えば、KME18は水深2,052mに設置されたDONET1の観測点で、2011年1月に設置されて海底現場での観測が開始された(図1)。海底に設置した直後からのKME18の圧力計の観測データを潮汐解析プログラムで解析し、観測データから潮汐成分を分離したものを図1に示す。図1には海洋物理に起因する海面変動の成分も含まれているが、最大の変動成分はドリフトで、KME18では年間10cm以上に相当するドリフトが重畳されたことがわかる。南海トラフのプレート沈み込み速度が年間数cm程度であることから、鉛直方向の地殻変動量を圧力計の観測データから直接的に計測することは困難と考えられる。

そこで本研究では、DONETやS-netで採用されている水晶振動子を受圧部にもつ「水晶振動式圧力計」に加えて、主に工業分野で利用されているシリコン単結晶の半導体素子を受圧部にもつ「シリコン振動式圧力計」に対して、重錘形圧力天びんで生成した一定圧力を連続印加して、両者を比較する。室内実験では、シリコン振動式圧力計のシールドゲージ圧タイプ圧力計も評価対象に加えて、室内実験による圧力計のドリフトをモデル化し、感圧タイプが異なる圧力計のドリフト特性について考察する。

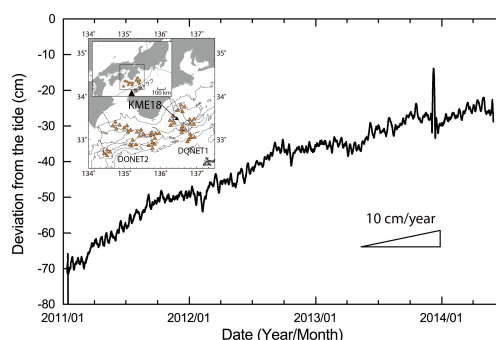


図1: DONETのKME18観測点で海底設置直後から観測された水晶振動式圧力計のドリフト

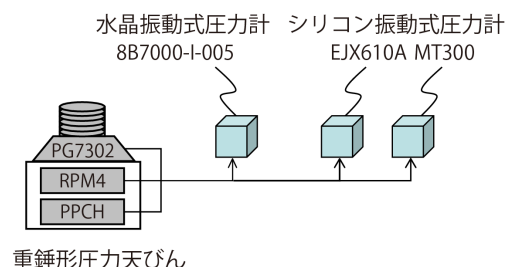


図2: 本研究で実施した室内実験の主要な構成装置

3. 研究の方法

(1) 室内実験と試験条件

本研究の室内実験で利用する圧力標準に関する計測システムは、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する(図2)。ピストン-シリンダと重錘が、重錘形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、重錘形圧力天びんは高精度の基準圧力を生成する(図3)。

PG7302はピストン位置を常に監視する。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する。ピストン位置を監視しながら、供給圧力を自動制御するため、重錘形圧力天びんから一定圧力を連続的に供給することが可能である。

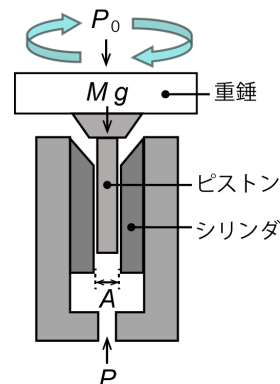


図3: 重錘形圧力天びんの動作原理

(2) 室内実験で計測する圧力計

本研究では、複数タイプの圧力計に対して重錘形圧力天びんから同時に印加する。室内実験で計測する圧力計を表 1 に示す。水晶振動式圧力計は 2 式の 8B7000-I-005 (Paroscientific 社) を、シリコン振動式圧力計は 4 式の EJX610A (横河電機 (株)) ならびに 3 式の MT300 (横河計測 (株)) を準備して、合計 9 式の圧力計を評価した。なお MT300 は、本研究の実施期間の途中から評価の対象に追加した。

加圧できる最大圧力は、すべての圧力計で 70 MPa である。8B7000-I-005 と EJX610A は完全真空を基準とする絶対圧力計で、MT300 は擬似大気圧を基準とするシールドゲージ圧力計である。8B7000-I-005 と MT300 はセンサ内部でデータ処理されて圧力の物理値に変換されたものが出力される。EJX610A は 4~20 mA の電流値が出力されるため、0.1 hPa 分解能で計測できる圧力レンジに設定してデータロガーで計測した。

重錘形圧力天びん PG7302 (図 2) から圧力計の入力ポートを通じて、水深 2,000 m に相当する 20 MPa の一定圧力を連続的に印加した。すべての圧力計を室温環境で計測した。また MT300 を除く圧力計は、低温恒温槽にセットして海底環境と同じ 2 の温度環境でも計測した。

表 1: 室内実験で計測する圧力計

圧力計タイプ	形名	製造元	基準圧力	数量	シリアル番号
水晶振動式 (絶対圧力計)	8B7000-I-005	Paroscientific	完全真空	2	148396
					148399
シリコン振動式 (絶対圧力計)	EJX610A	横河電機(株)	完全真空	4	9667
					9668
					9669
					9670
シリコン振動式 (シールドゲージ圧)	MT300	横河計測(株)	疑似大気圧	3	301917
					301271
					708152

4. 研究成果

(1) 低温環境における試験結果

低温恒温槽を使った室内実験では、ドリフト特性の再現性を確認するため、大気圧に開放する期間を挟んで、2 回の連続加圧を実施した。1 回目の加圧は 2020 年 7 月 17 日から 8 月 1 日までの 15 日間、そして 2 回目の加圧は 8 月 7 日から 10 月 9 日までの 63 日間である。1 回目と 2 回目の連続加圧の期間に、センサが出力する圧力値と重錘形圧力天びんが発生する基準圧力値との差分をとった時系列を図 4 に示す。2 回目の試験の途中に、重錘形圧力天びんを利用できない期間があったため、バルブを閉じて圧力計側の配管系内の圧力をほぼ 20 MPa に保持していた。重錘形圧力天びんと切り離れた期間は、大まかには 8 月 17 日から 8 月 30 日にかけてと 9 月 13 日から 9 月 23 日にかけての期間で、重錘形圧力天びんに接続されず標準圧力が印加できなかった期間のため欠測としている。図 4 では感圧方式の違いについて考察しやすいように、(a)水晶振動式圧力計、(b)シリコン振動式圧力計に分けて結果を示す。黒点は計測データ、赤線は指数成分と線形成分を組み合わせた近似関数でフィットさせた曲線である。指数成分は初期ドリフト、線形成分は長期ドリフトを規定するものである。

印加を開始した当初は水晶振動式、シリコン振動式に関わらず全圧力計とも、指数成分が卓越して下向きのドリフトを示している。シリコン振動式圧力計は 4 式ともほぼ同じ下向きのドリフトを示し、その変化量は水晶振動式圧力計よりも大きいことが確認できた。

1 回目と 2 回目の連続加圧の間に、大気圧開放していた期間は 7 日間程度であるが、前後で有意なヒステリシス(計測値の不連続)は観測されていない。加圧は連続していないが、長期ドリフトの特性は保持されていると考えられる。1 回目の加圧が終了して、大気圧に一旦戻すことでドリフトが解消され、2 回目の加圧で再びドリフトが発生する。全圧力計で 1 回目と 2 回目で加圧開始時の圧力偏差はほぼ同じであることから、15 日間の連続印加後に 7 日間大気圧に開放することで、ドリフトの大部分は元の偏差に戻ったことを示唆する。

水晶振動式圧力計は 1 回目と 2 回目で初期ドリフトの特性の違いは小さいが(図 4(a))、シリコン振動式圧力計の初期ドリフトの特性は顕著に異なる(図 4(b))。1 回目で連続加圧した時間が大気圧開放していた時間よりも長かったため、長期ドリフトが完全に開放される前に再加圧したため、長期ドリフトが大きい水晶振動式圧力計で初期ドリフトの再現性が低くなったと考えられる。2 回目の加圧のドリフト曲線が、1 回目の加圧のドリフト曲線の延長線に漸近するように観測されたことは、この解釈を支持する。

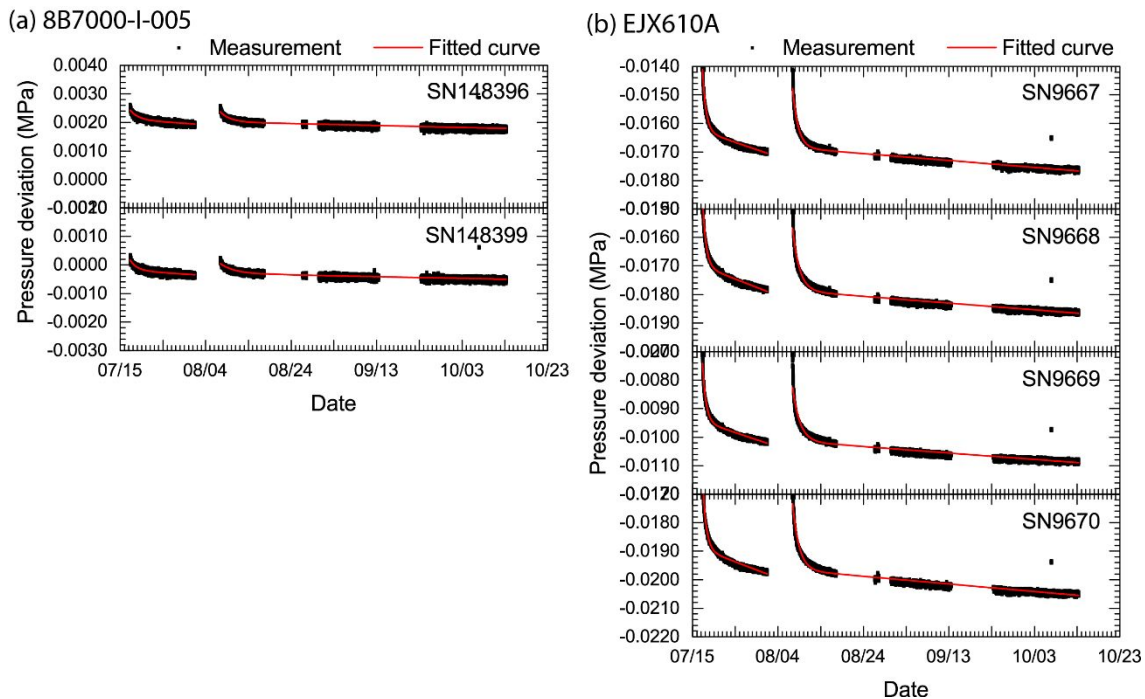


図 4: 低温環境で(a)水晶振動式圧力計、(b)シリコン振動式圧力計が観測するドリフト

(2) 室内環境における試験結果

次に、シールドゲージ圧タイプのシリコン振動式圧力計である MT300 を追加して、連続加圧を実施した。MT300 は恒温槽内に入れることが困難なため、すべての圧力計を室温環境で計測した。1 回目の連続加圧は 2021 年 4 月 13 日から 5 月 11 日までの 28 日間、2 回目の連続加圧は 2021 年 5 月 18 日から 6 月 16 日までの 28 日間である。1 回目と 2 回目の連続加圧にともなう圧力偏差の時系列を図 5 に示す。図 5 では、水晶振動式圧力計の(a) 8B7000-I-005、シリコン振動式圧力計の(b) EJX610A および(c) MT300 に分類して結果を示す。

4 月 13 日からの 1 回目の印加開始から間もなく 4 月 18 日に圧力コントローラ PPCH が作動せず一時的に圧力が低下したため、計測に外れ値が重畳されている。印加を開始した当初は、低温環境での計測と同様に、水晶振動式、シリコン振動式にかかわらず全圧力計とも、指数成分が卓越して下向きのドリフトを示している。

長期ドリフトの特性を表すのは線形成分である。図 5(a) に示す水晶振動式圧力計の線形成分の係数値は、図 4(a) に示した低温環境での計測よりも相対的に小さくなった。例えば SN148396 は、低温環境では -9.5 Pa/日だったものが常温環境では -15.1 Pa/日に変化した。すなわち、低温環境よりも室温環境の方がドリフトが大きくなることを示唆する。本研究の試験結果は、水晶振動式圧力計を対象として環境温度の影響を考察した先行研究と調和的である。

図 5(b) に示すシリコン振動式圧力計 EJX610A も低温環境で計測している(図 4(b))。EJX610A のドリフトも水晶振動式圧力計と同様、低温環境よりも室温環境の方が相対的に大きい結果を示した。図 5(c) に示す MT300 は、図 5(b) の EJX610A と同じシリコン振動式圧力計であるが、EJX610A よりもドリフトは小さい結果となった。

5 月 18 日からの 2 回目の連続印加によるドリフトは、感圧タイプによらずいずれの圧力計も 1 回目のドリフトの延長線に漸近するように観測された。ただし、1 回目の連続加圧が終了して 2 回目の連続加圧を再開するまでに戻ったドリフトは、EJX610A が他の圧力計と比較して大きい傾向を示した。

(3) 室内実験のまとめ

本研究では、海底津波計で観測されるドリフトについて考察するため、複数タイプの圧力計に対して重錘形圧力天びんから一定圧力を連続加圧して計測データを解析した。本研究で得られた主要な成果は以下の通りである。

水晶振動式圧力計とシリコン振動式圧力計に対して、重錘形圧力天びんにより水深 2,000 m に相当する 20 MPa を連続加圧した。

室内実験で圧力計のドリフト現象を再現し、指数関数と線形関数の組み合わせでモデル化した。

一時的な大気圧開放を挟んで連続印加を繰り返したところ、感圧タイプや圧力計の種類によらず、ドリフトは当初のドリフトに漸近することを示唆した。

同一の圧力計を低温環境と室温環境で連続加圧したところ、低温環境では長期ドリフトは小さくなる傾向が見られた。

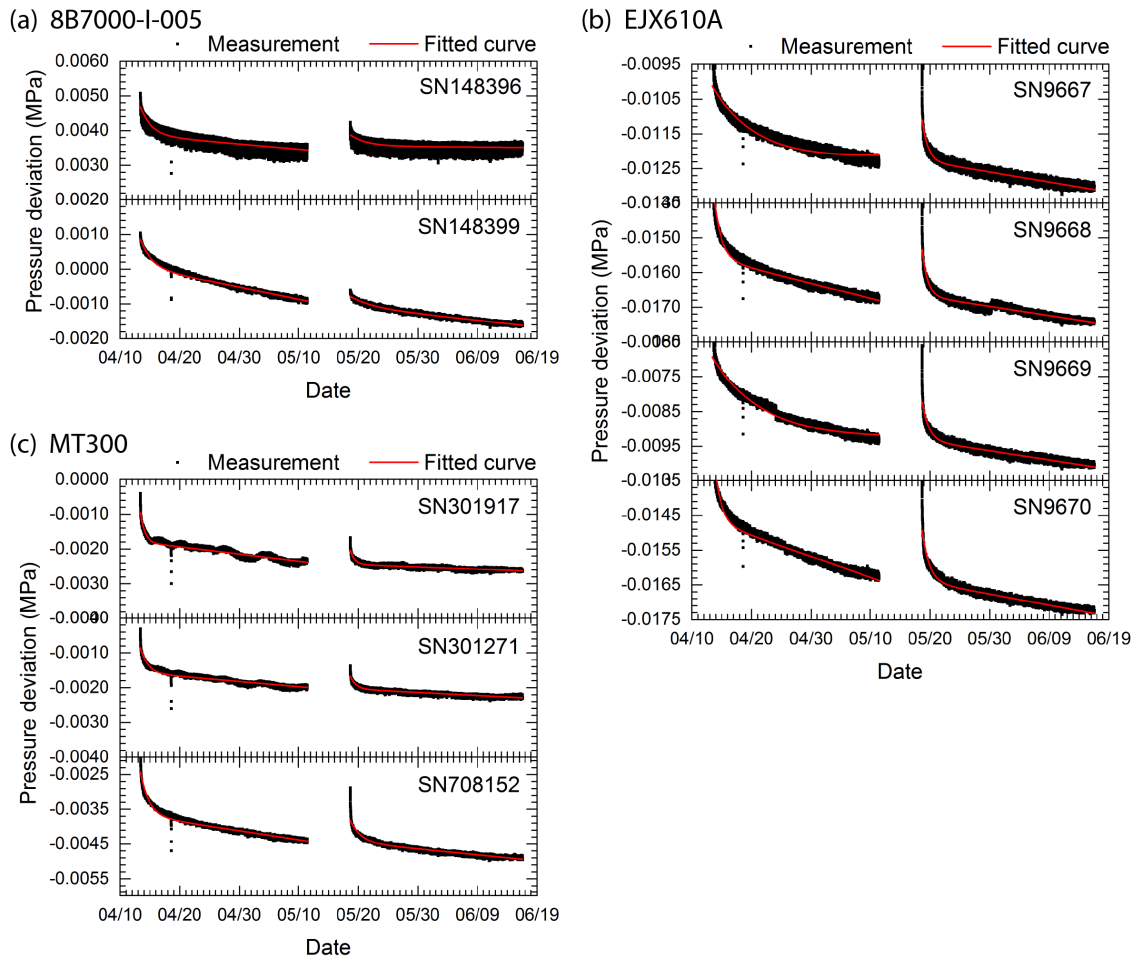


図 5: 室内環境で(a)水晶振動式圧力計、(b)シリコン振動式圧力計、(c)シールドゲージ圧タイプのシリコン振動式圧力計が観測するドリフト

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 松本 浩幸、梶川 宏明、有吉 慶介、高橋 成実、荒木 英一郎	4. 巻 78
2. 論文標題 地震時に海底津波計が観測する動水圧変動に関するデータ解析	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 土木学会論文集B2(海岸工学)	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/kaigan.78.2_1_169	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Matsumoto Hiroyuki、Araki Eiichiro	4. 巻 8
2. 論文標題 Drift characteristics of DONET pressure sensors determined from in-situ and experimental measurements	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Frontiers in Earth Science	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/feart.2020.600966	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 松本浩幸、永野憲、有吉慶介、荒木英一郎、町田祐弥、西田周平、木村俊則	4. 巻 77
2. 論文標題 相模湾における長期海底圧力観測への海洋変動の影響	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 土木学会論文集B2(海岸工学)	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/kaigan.77.2_1_901	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 松本 浩幸、柄本 邦明、今井 健太郎、高橋 成実	4. 巻 76
2. 論文標題 リアルタイム津波予測のための台風接近時における海底津波計データの解析	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 土木学会論文集B2(海岸工学)	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/kaigan.76.2_1_319	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 松本 浩幸、木村 俊則、荒木 英一郎、西田 周平、町田 祐弥	4. 巻 75
2. 論文標題 水圧式津波計の観測データに重畳される現象の室内実験による検証と分析	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 土木学会論文集B2(海岸工学)	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/kaigan.75.l_1339	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kajikawa Hiroaki、Kobata Tokihiko	4. 巻 8
2. 論文標題 Different long-term characteristics of hydraulic pressure gauges under constant pressure applications	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ACTA IMEKO	6. 最初と最後の頁 19~24
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.21014/acta_imeko.v8i3.665	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計6件(うち招待講演 1件/うち国際学会 0件)

1. 発表者名 松本浩幸、梶川宏明
2. 発表標題 重錘形圧力天びんによる圧力計の連続印加実験 - 海底津波計の高度利用に向けて -
3. 学会等名 日本地震工学会・大会 - 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松本浩幸、梶川宏明、有吉慶介、荒木英一郎
2. 発表標題 重錘形圧力天びんを使った圧力計のドリフト特性の室内実験
3. 学会等名 日本地震学会2022 年度秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松本浩幸、梶川宏明
2. 発表標題 重錘形圧力天びんによる圧力計のドリフト特性に関する室内実験
3. 学会等名 日本地震工学会・大会 - 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 有吉 慶介、永野 憲、松本 浩幸、長谷川 拓也、伊東 優治
2. 発表標題 海底圧力に及ぼす力学の多様性とその相互関係の理解
3. 学会等名 2021年度日本海洋学会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松本 浩幸、柄本 邦明、今井 健太郎、高橋 成実
2. 発表標題 台風接近時の海底津波計データの周波数特性について - 近地津波との比較
3. 学会等名 日本地震学会2020年度秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松本 浩幸、荒木 英一郎
2. 発表標題 海底津波計で観測されるドリフトの予測に関する研究
3. 学会等名 日本地震工学会・大会 - 2020
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	梶川 宏明 (Kajikawa Hiroaki) (50443180)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・計量標準総合センター・研究グループ長 (82626)	
研究分担者	木村 俊則 (Kimura Toshinori) (30520845)	国立研究開発法人海洋研究開発機構・海域地震火山部門(地震津波予測研究開発センター)・副主任研究員 (82706)	
研究分担者	有吉 慶介 (Keisuke Ariyoshi) (20436075)	国立研究開発法人海洋研究開発機構・海域地震火山部門(地震津波予測研究開発センター)・グループリーダー (82706)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------