

3. 遠州灘での試験観測

— 新型自己浮上式海底水圧計と気象庁東南海ケーブル式海底水圧計の比較 —

開発した新型自己浮上式海底水圧計の性能について、高压の海底下の環境で実際に水圧が測定できるか、計測システムが正常に動作するかなどを含め、総合的に評価するため、実海域での試験観測を実施した。試験海域としては遠州灘を選定した。遠州灘には気象庁のケーブル式海底水圧計が設置されており、その記録と比較することができるからである（図4）。

遠州灘での新型自己浮上式海底水圧計の設置と回収は、気象庁の海洋気象観測船「凌風丸」を用いて2013年に潮岬南方沖で実施した海底地震観測の回収航海（航海名：RF-1308）に併せておこなった。乗船者等を表4に示す。新型自己浮上式海底水圧計は、2013年9月26日に設置し、10月3日に回収した。

新型自己浮上式海底水圧計の設置位置は御前崎の南西沖約60 kmで、音響通信による三点測量で求めた値は北緯34度13.051分、東経137度41.454分、水深1116 mである（図4中のpOBPG）。この地点は、東南海ケーブル式海底水圧計 TNK3（北緯34度13.04分、東経137度41.52分、水深1103 m）から西北西に約100 m離れた位置にあたる。水圧計の観測パラメータは、圧力と温度の両方を計測する KP2モード、サンプリング周波数を100

Table 4 Researchers and engineers who participated in the research cruise RF-1308

表4 RF-1308のOBS、OBPG関係の乗船者

航海日：2013年9月25日～10月7日
航海名：RF-1308
船 舶：気象庁地球環境・海洋部 凌風丸
乗船者：山崎 明・対馬弘晃（気象研究所）、馬場久紀（東海大学）、 松原忠泰（東京測振）、井澤 絢・野本博之（勝島製作所）

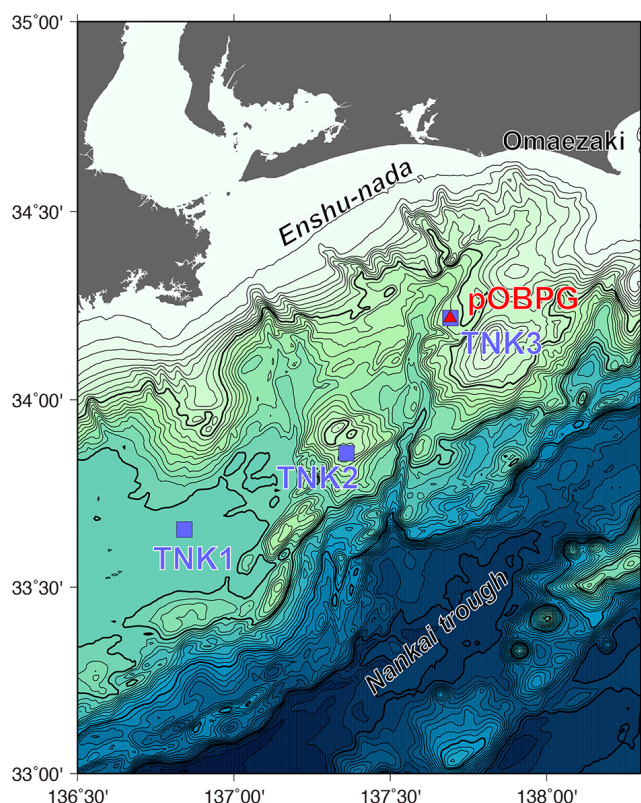


Fig. 4 Location of the newly developed pop-up OBPG (red triangle) in the trial observation, and cabled OBPGs (blue squares). Contour lines indicate isobaths at 100 m intervals. Water depths at the sensors are 1116 m (pOBPG), 2050 m (TNK1), 1120 m (TNK2), and 1103 m (TNK3).

図4 新型自己浮上式海底水圧計とケーブル式海底水圧計の位置。赤い三角印（pOBPG）が新型自己浮上式海底水圧計、青い四角印（TNK1～3）がケーブル式海底水圧計の位置を示す。等値線は水深を示し、100 m 間隔。各海底水圧計の設置地点の水深は、pOBPG が1116 m、TNK1が2050 m、TNK2が1120 m、TNK3が1103 m。

Table 5 Measurement parameters for the newly developed OBPB during deep-ocean pressure observations

表 5 実海域観測における各計測パラメータの設定値

パラメータ名	設定値	備考
計測モード	KP2	圧力及び温度の計測
サンプリング周期	10	10 msec (100 Hz) サンプリング
PI	1	水圧センサからの計測データ報告時間間隔 1 msec
IA	5	カットオフ周波数 44 Hz
FM	1	Fetch モード
OI	0	圧力及び温度を同じタイミングで積分
XM	1	IIR フィルター
XN	0	デフォルトの桁数で計測
UN	5	圧力の単位は MPa

Hz、カットオフ周波数を 44 Hz に設定した。他の観測パラメータについては表 5 にまとめた。また記録の開始は、2013 年 9 月 28 日 6 時からとした。

新型自己浮上式海底水圧計の設置・回収時の様子を写真 4 に示す。外装については元々の海底地震計から大きくは変えていないため、船上から海面への投入、及び海面から甲板への揚収作業は、海底地震計の場合と同じである。また、制御収録部の水晶時計が時間経過とともに徐々にずれていくため、投入直前と回収直後に GPS マスタークロックとの時刻差を計測することで、観測データに付された時刻を校正する。今回の観測では、新型自己浮上式海底水圧計の投入直前と回収直後の時刻ずれは約 10 msec であったが、以降の考察に影響しないため、ここでは時刻校正を施していない。

図 5 から図 10 に遠州灘で観測された新型海底水圧計のデータを 1 日ごとに示す。上からそれぞれ水圧、水温、時刻スタンプ間隔の経時変化、水圧変化のパワースペクトルである。サンプリング周波数を 100 Hz に設定したので、時刻スタンプの間隔は 10 msec となるはずであるが、制御収録装置の割り込み処理タイミング等の問題で、10 msec から ± 0.6 msec の範囲でずれることがある。水圧変化のパワースペクトルを求めるにあたっては、3 次スプライン関数で 1 msec 間隔に補間したうえでフーリエ変換した。フーリエ変換では、圧力データを、重複を許しながら約 1 時間毎の時系列に分割してスペクトルを求め、最後にそれらをスタックした。

海底水圧の平均値は 11.3 MPa であり、概ね設置水深の水圧値を正常に計測できていると判断される（図 5 から図 10）。水圧変化は 0.007–0.01 MPa 程度の振幅で正弦波状の変化を示しているが、これは 70–100 cmH₂O の振幅の海洋潮汐で説明することができる。観測された水圧変化のバラツキ（線の太さ）は 2–3 cmH₂O（200–300 Pa）で（図 11）、パワースペクトルをみると 22 Hz 付近にやや幅広だが顕著なスペクトルのピークと、0.1–1 Hz にわたるピークが見られる（図 5 から図 10）。このうち、前者の卓越周期をもつノイズは、実海域観測前に室内で実施した大気中試験でも同程度の振幅で観測されていたことから、測定環境に依るものではなく、水圧センサ自体あるいは他の装置も含めた計測システム全体に起因するものと考えられる。一方、後者は、室内実験では確認されておらず、海底環境における脈動が計測されたものと考えられる。

図 10 は、10 月 3 日に新型自己浮上式海底水圧計の回収を行った時の記録である。8 時 00 分に切り離しコマンドを送信し、8 時 21 分に海面への新型自己浮上式海底水圧計の浮上が確認された。浮上中は直線的に降圧している様子がわかる。また水温は海底の水温 4 °C から海面の水温 18 °C に上昇した。

図 11 に新型自己浮上式海底水圧計と東南海ケーブル式海底水圧計による観測記録を比較した図を示した。一見して新型自己浮上式海底水圧計の分解能が格段に優れていることがわかる。東南海ケーブル式海底水圧計の分解能は 10 Hz サンプリング時 1 cmH₂O（100 Pa）なので、図 11 では東南海ケーブル式海底水圧計の圧力計測



Photo 4 Deployment and recovery operations for pop-up OBPG.
Pressure gauge being deployed (top), popped-up (middle), and recovered (bottom).

写真 4 新型自己浮上式海底水圧計の設置・回収作業状況。
上：海底水圧計の投入作業 中：海底水圧計の回収作業 下：回収し、甲板に引き揚げた海底水圧計

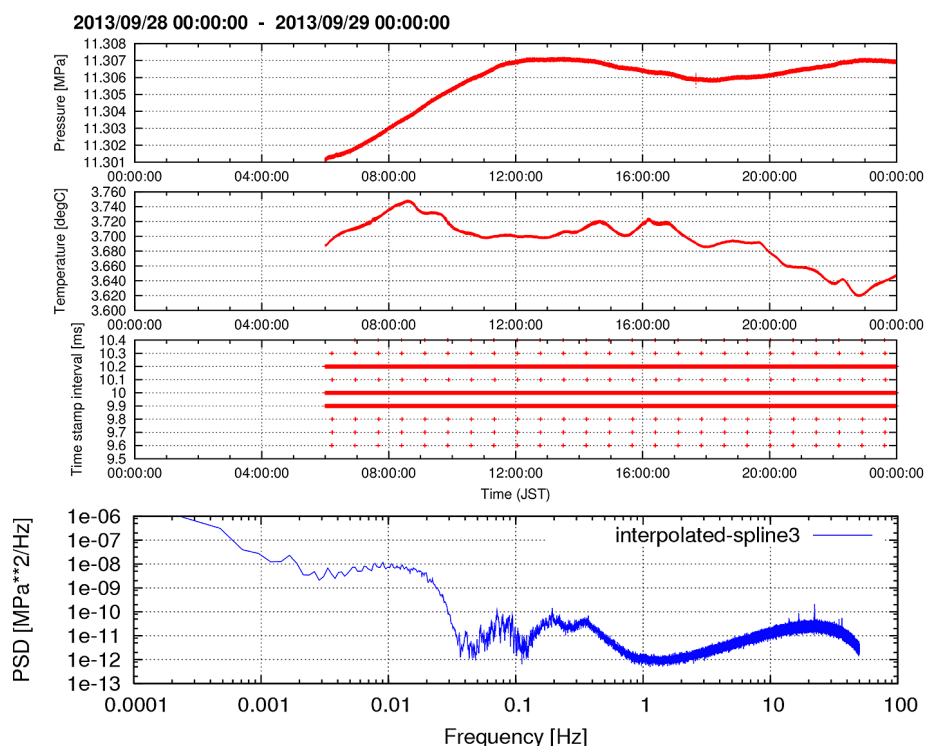


Fig. 5 Records measured with new pop-up OBPG in the deep ocean on September 28, 2013.

From top, the plots are of pressure, temperature, time-stamp interval, and power spectrum density of the pressure.

図5 2013年9月28日の時系列、および水圧変化のパワースペクトル。

上から水圧、水温、サンプリング間隔、水圧変化のパワースペクトル。

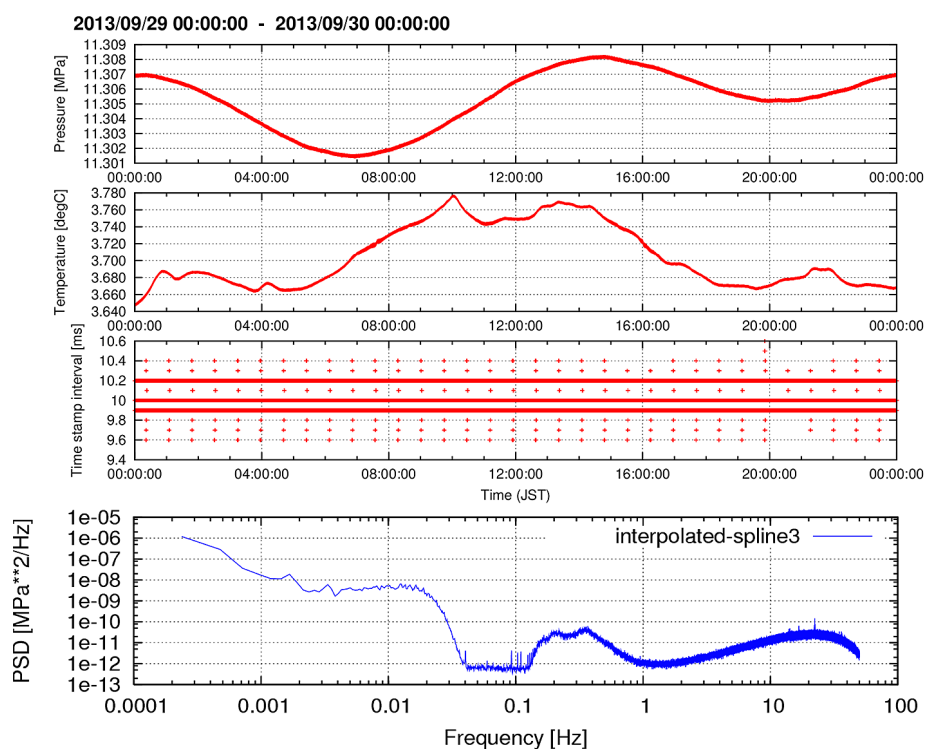


Fig. 6 Records measured with new pop-up OBPG in the deep ocean on September 29, 2013.

Plot details are the same as for Fig. 5.

図6 2013年9月29日の時系列、および水圧変化のパワースペクトル。

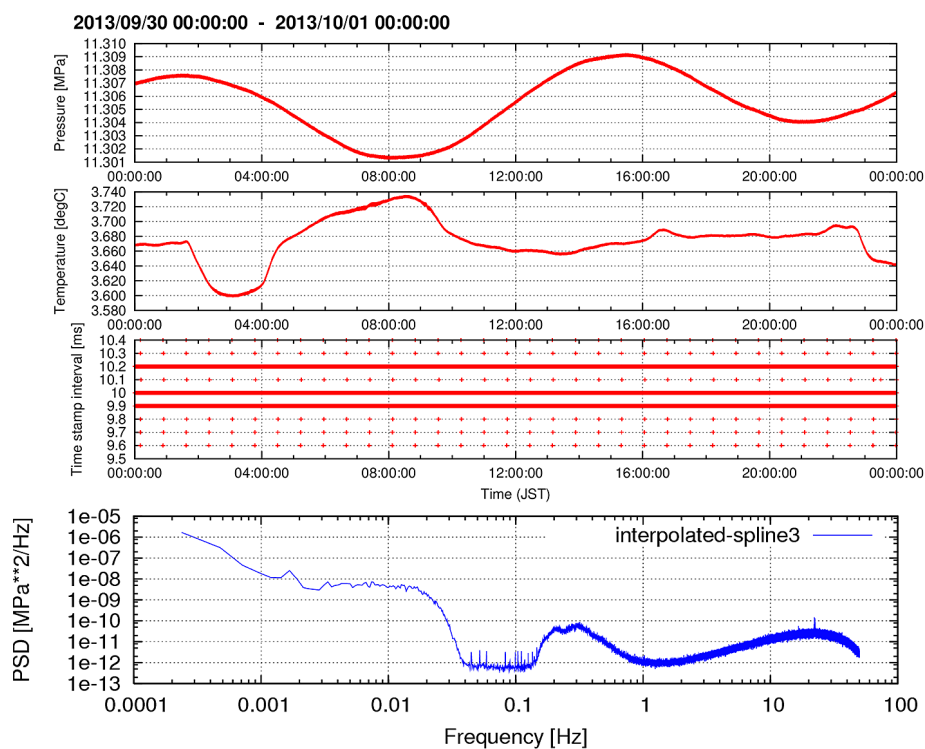


Fig. 7 Records measured with new pop-up OBPG in the deep ocean on September 30, 2013.
Plot details are the same as for Fig. 5.

図7 2013年9月30日の時系列、および水圧変化のパワースペクトル。

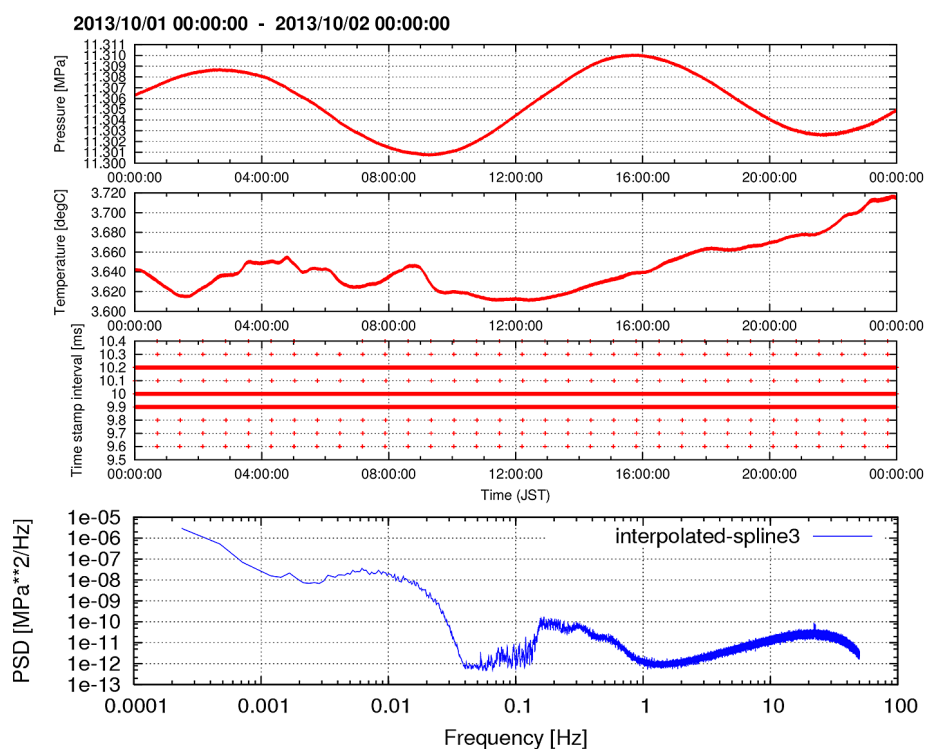


Fig. 8 Records measured with new pop-up OBPG in the deep ocean on October 1, 2013.
Plot details are the same as for Fig. 5.

図8 2013年10月1日の時系列、および水圧変化のパワースペクトル。

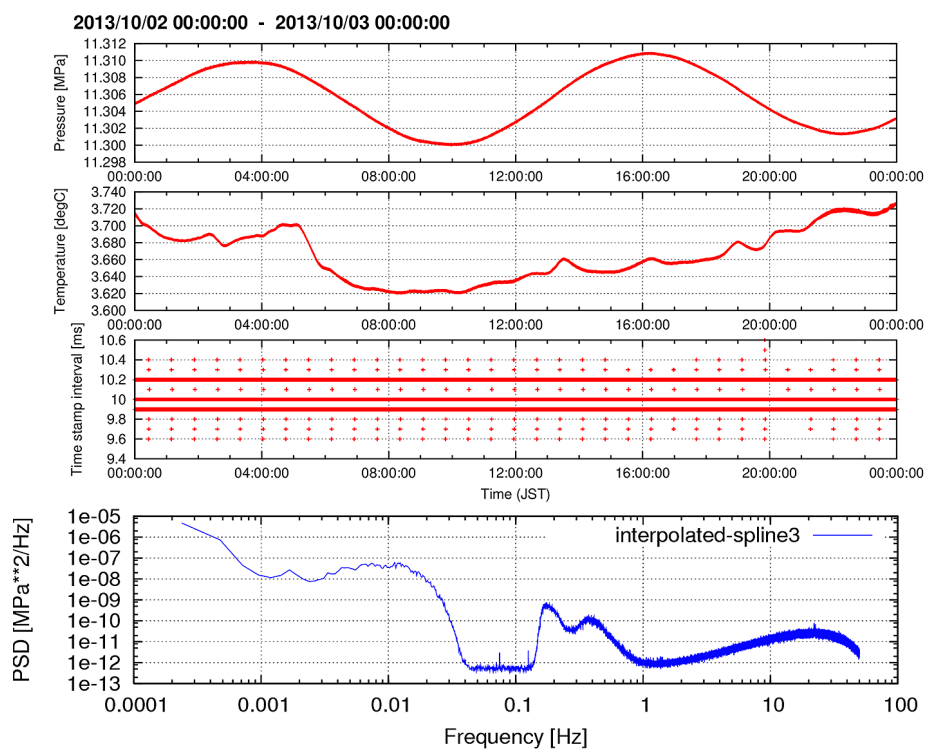


Fig. 9 Records measured with new pop-up OBPG in the deep ocean on October 2, 2013.
Plot details are the same as for Fig. 5.

図9 2013年10月2日の時系列、および水圧変化のパワースペクトル。

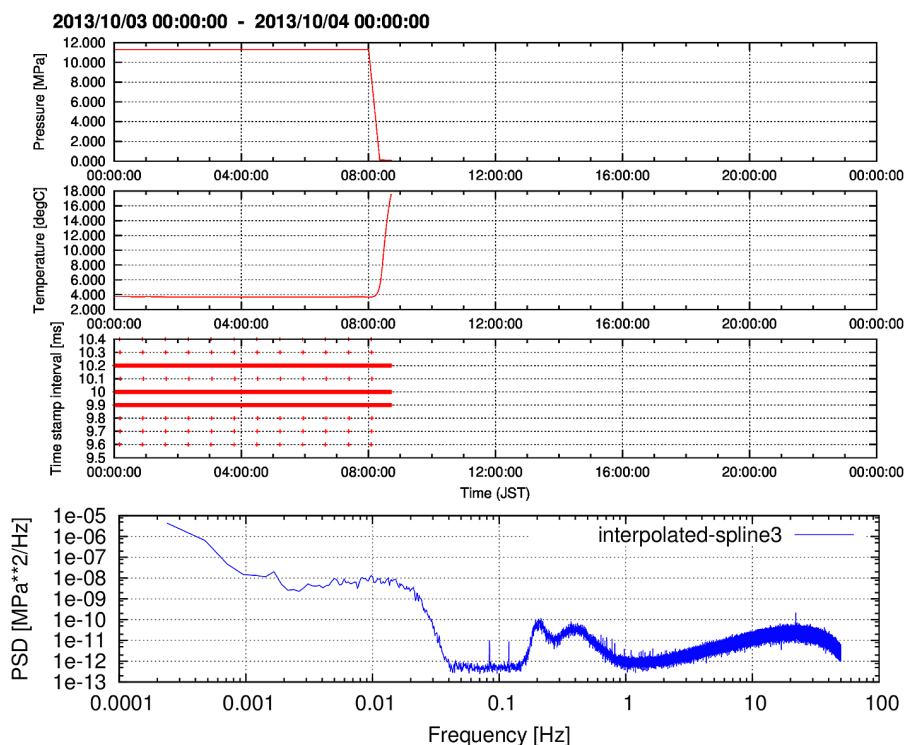


Fig. 10 Records measured with new pop-up OBPG in the deep ocean on October 3, 2013.

Plot details are the same as for Fig. 5. The power spectrum density was calculated using pressure data obtained before 0800 hours JST to avoid the effect of recovery operations on the pressure measurements.

図10 2013年10月3日の時系列、および水圧変化のパワースペクトル。スペクトルは、回収作業開始前の時間帯（0時から8時）のデータから求めた。

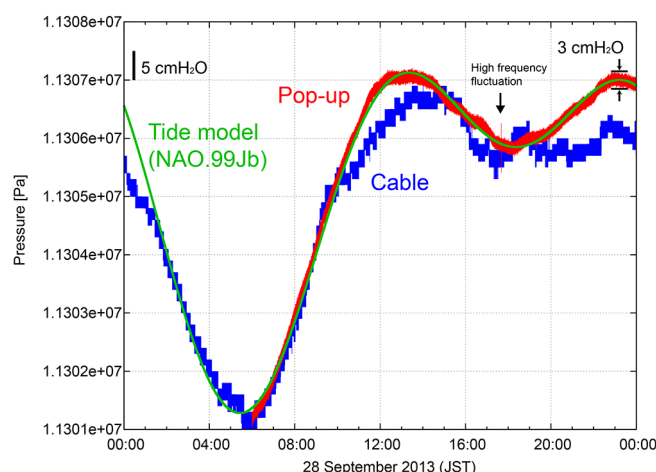


Fig. 11 Comparison of pressure data (24-h period) obtained on September 28, 2013, from the new OBPG (red line) and from existing JMA cabled pressure gauge TNK3, both located on the continental shelf off the Omaezaki Peninsula, Tokai region. Green line indicates an oceanic tide component predicted by theoretical tide model NAO.99Jb (Matsumoto *et al.*, 2000).

図11 2013年9月28日における新型自己浮上式海底水圧計とケーブル式海底水圧計の水圧記録の比較。赤実線は新型自己浮上式海底水圧計による観測記録（図中 Pop-up）、青実線は極近傍に設置してある気象庁の東南海ケーブル式海底水圧計 TNK3による観測記録（図中 Cable）。緑実線は理論潮汐モデル NAO.99Jb (Matsumoto *et al.*, 2000) を用いて計算した理論潮汐値（図中 Tide model）。

分解能を表す1量子化ステップ相当の階段状変化が視認できる。海洋潮汐モデル NAO.99Jb (Matsumoto *et al.*, 2000) による理論値（図11の緑線）と比較すると、新型自己浮上式海底水圧計で計測された圧力の長周期成分は、理論潮汐値と概ね一致する。一方、ケーブル式海底水圧計については、理論潮汐値からのずれが大きい。このずれの原因としていくつかの要因が考えられるが、もしかしたらケーブル式海底水圧計の周囲に急激な温度擾乱が起き、ケーブル式海底水圧計の製造メーカーから提供された温度補正係数を用いた静的温度補正だけでは補正しきれなかったために生じた見かけの圧力変動が計測されたのかもしれない（例えば、Baba *et al.*, 2006; Hirata and Baba, 2006; Inazu and Hino, 2011）。ケーブル式海底水圧計の観測水圧変化と理論潮汐値とのずれの原因の究明は本論の目的から外れるため、ここではその原因の1つの可能性だけを指摘するに留める。

図12は、今回の実海域試験の観測期間中の2013年9月28日17時40分頃に新型自己浮上式海底水圧計で捉えられた微小な水圧変動の100 Hz サンプリング観測波形（赤実線）である（図11の矢印部分に相当）。比較のために、極近傍に設置されていた気象庁の東南海ケーブル式海底水圧計 TNK3の10 Hz サンプリング観測波形（青実線）も図中に示している。新型自己浮上式海底水圧計では、17時40分36.4秒、17時40分40.3秒、および17時40分40.6秒に、3つのバースト信号状の短周期の水圧変動が観測されている。3つのバースト信号状の水圧変動の振幅は、それぞれ両振幅で、約7.4 cmH₂O（約740 Pa）、約3.5 cmH₂O（約350 Pa）、および約6.7 cmH₂O（約670 Pa）、その主要な周期はいずれも約0.07秒（約15 Hz）と見積もられる。気象庁の一元化地震カタログには、これらの水圧変動が生じた時間帯に震源時を持つ地震は掲載されていない。仮に、1つ目をP波、2つ目を堆積層下端で変換したSP変換波、3つ目をSV波とみなすのならば、S-P時間は約4秒と見積もられ、震源距離が数10 km程度の地点で発生した近地の微小地震と解釈できる。

注目すべきは、新型自己浮上式海底水圧計の100 Hz サンプリング記録に現れているこれらの水圧変動が、10 Hz サンプリングの気象庁の東南海ケーブル式海底水圧計 TNK3では記録されていない点である。東南海ケーブル式海底水圧計の10 Hz サンプリング計測時（水晶発振器のカウンタ数とクロック数から0.1秒間の発振周波

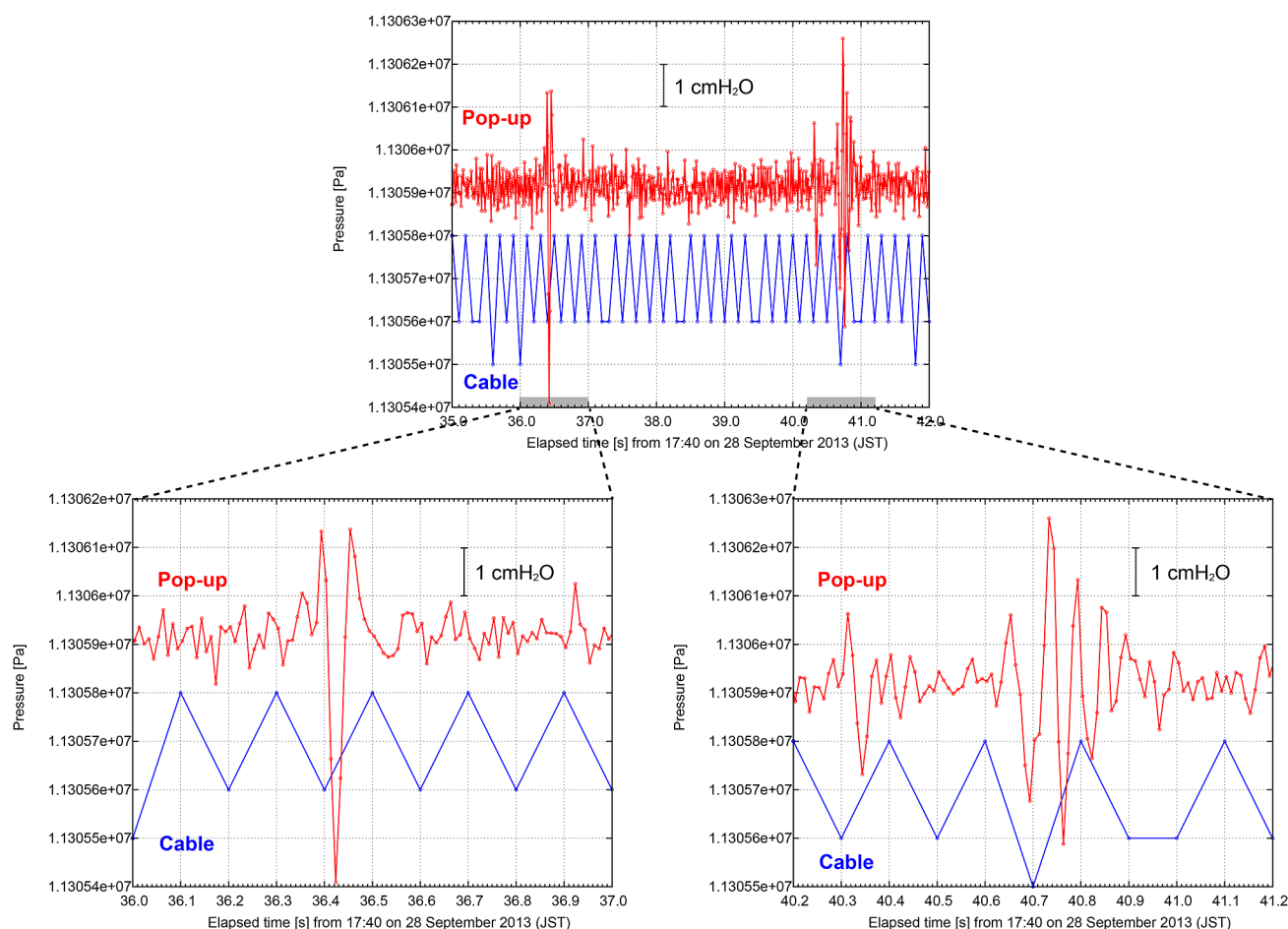


Fig. 12 Comparison of pressure data obtained during a test experiment at 17:40 (JST) on September 28, 2013, from the new OBPG (0.01-sec intervals, red line) and from existing JMA cabled pressure gauge TNK3 (0.1-sec intervals, blue line), both located on the continental shelf off the Omaezaki Peninsula, Tokai region. These data indicate that the new OBPG system provides superior pressure sensitivity and resolves pressure changes at higher frequencies.

図12 実海域試験中の2013年9月28日17時40分頃に観測された微小水圧変動の観測例。赤実線は新型自己浮上式海底水圧計で観測された波形記録（図中 Pop-up）、青実線は極近傍に設置してある気象庁の東南海ケーブル式海底水圧計 TNK3による観測記録（図中 Cable）。

数を計算した場合）の圧力分解能は約 $1 \text{ cmH}_2\text{O}$ (100 Pa) であり（図1）、その計測分解能から単純に考えると、TNK3でもこれら3つの信号が記録されていても良いように思われる。しかし、これら15 Hzに主要な周波数を持つ3つのバースト状信号は、東南海ケーブル式海底水圧計による10 Hz サンプリング計測のNyquist周波数5 Hzよりも高い周波数領域に主要なパワーを持つ変動現象であったために、エイリアシング作用によって周波数軸上で2回折り返され、5 Hz付近（5 Hzよりほんの少し低周波数側）の偽信号成分あるいは折り返し雑音成分として計測されてしまっているものと想像される。

サンプリング定理により、東南海ケーブル式海底水圧計 TNK3の10 Hz サンプリング波形記録では5 Hz以上の信号成分は評価することはできない。したがって、図12の東南海ケーブル式海底水圧計 TNK3の記録で視認できる周期0.2秒、両振幅で2–3 cmH_2O (200–300 Pa) の信号は、海底で生じている背景的水圧変動の5 Hz付近の成分だけを計測したのではなく、おそらくNyquist周波数5 Hz以上の高周波数帯域の信号から派生した折り返し雑音成分も含まれていると考えられる。さらに、このようなエイリアシング現象に加え、東南海ケーブル式水圧計の圧力計測分解能は $1 \text{ cmH}_2\text{O}$ と粗いため、量子化ステップとしては2–3つ分しかない、ダイナ

ミックレンジが非常に狭い計測となってしまう。繰り返しになるが、サンプリング定理に基づけば、東南海ケーブル式海底水圧計では5 Hzの周波数の信号は評価できない。

4. まとめ

気象研究所では、細かい圧力分解能で海底圧力を高速サンプリング計測できる自己浮上式海底水圧計を新たに開発し、その性能を評価するため遠州灘で実海域試験を行った。開発した自己浮上式海底水圧計は、既存の海底地震計をベースにして改造したもので、水圧センサと同水圧センサ専用の制御収録装置等が組み込まれており、海底の圧力及び温度を計測することができる。最高100 Hz サンプリングの計測が可能で、圧力分解能は100 Hz サンプリング時で約3 cmH₂O (300 Pa)、10 Hz サンプリング時で約0.3 mmH₂O (3 Pa)、1 Hz サンプリング時で約0.1 mmH₂O (1 Pa) である(表3)。観測可能期間は最長で6ヶ月である。

遠州灘の実海域試験においては、2008年以降稼働中のケーブル式海底水圧計近傍の深海底(水深1116 m)に約1週間設置し、100 Hz サンプリングで海底圧力・温度の試験観測を行った。その結果、(1) 海洋潮汐に伴う長周期の圧力変動と、(2) 3つのバースト信号状の短周期変動から成る圧力変動が計測された。(1)の長周期変動は、ケーブル式海底水圧計で記録された変動と概ね一致するが、新型海底水圧計のほうが微細な圧力変動を計測できており、その圧力分解能の高さを示している。また、(2)の短周期変動の波群はケーブル式海底水圧計では計測されていない。このことは本研究で開発した新型自己浮上式海底水圧計が高い計測能力を有していることを示している。一方で、自己浮上式海底水圧計の圧力記録には、2-3 cmH₂O (200-300 Pa)の範囲で定常的なばらつきがあり、周波数領域では、22 Hz 付近と0.2 Hz に付近にそれぞれ幅広なピークがみられた。室内における大気中試験観測結果も踏まえると、前者は水圧センサあるいはその他の装置も含めた計測システム全体に起因、後者はおそらく海底での脈動を記録したものと考えられる。

今回は短期間の観測であったが、開発した新型海底水圧計の性能を実海域試験を通して検証することができた。今後は、より長期間の実海域観測を実施し、このように通常は観測されていない高周波数帯域の地震動等による水圧変動の観測事例を増やすことにより、海底で生じている水圧変動現象の全体像を調査するとともに、新型海底水圧計の性能をさらに検証していく必要があるだろう。

謝 辞

本研究は、平成22年度から平成25年度にかけて、気象研究所地震火山研究部(当時)の重点研究「沖合・沿岸津波観測等による津波の高精度予測に関する研究」によっておこなわれた。本研究で開発した自己浮上式海底水圧計は気象研究所からの役務契約に基づき東京測振(株)によって製作された。同社の松原忠泰氏、伊藤芳孝氏、伊藤立也氏、杉田智也氏には製作過程および実海域試験などでお世話になった。また、水圧センサの検討や詳細な技術資料の入手には東邦マーカントイル(株)の大井拓磨氏のお世話になった。実海域試験においては、気象庁地球環境・海洋部の海洋気象観測船「凌風丸」に協力いただき、佐々木修船長以下乗組員、観測員をはじめ多くの関係者の方々のお世話になった。気象庁の東南海ケーブル式海底水圧計のデータの取得にあたっては、気象庁地震火山部の本多誠一郎氏、桑山辰夫氏、清本真司氏、上野寛氏、秋山加奈氏、丹下豪氏、および気象研究所地震津波研究部の林元直樹氏にご助力いただいた。一部の図の作成には、Generic Mapping Tool (Wessel and Smith, 1998)を使用した。記して、感謝の意を表する。