

# 災害警告、測地学的研究両用システムSeismic + Oceanic Sensors (SOS)

2019年7月30日

訳：小林 太郎



## Seismic + Oceanic Sensors (SOS)

Paroscientific 社は災害警告、測地学、そして気候変動の計測といった役割を全て満たす事が出来る「地動・海洋現象計測センサー総合システム（Seismic + Oceanic Sensors = SOS）」を考案、開発し、そのパフォーマンス評価に取り組んできた。SOS においては、地震や津波などの短期的な現象は高分解能を有する絶対圧力ゲージと 3 軸加速度計で計測可能である。また現場校正方法である「A-0-A」を用いてセンサードリフトを除去する事で、測地学的な計測や海水面変化といった長周期的な現象の観測も可能である。SOS モジュールは小型の総合システムであり、ケーブルシステム、海底観測システム（OBR）、そして ROV になどに容易に搭載可能である。

## 災害警告システムとしての役割

SOS モジュールに含まれる 3 軸加速度計と絶対圧力ゲージは地震動や津波といったダイナミックな地動や海洋現象によって引き起こされる水圧変動や加速度変動をそれぞれ同時に計測することが出来る。

（参考資料はこちら [http://paroscientific.com/pdf/10\\_Oceans\\_2012\\_Disaster\\_Warning\\_Systems.pdf](http://paroscientific.com/pdf/10_Oceans_2012_Disaster_Warning_Systems.pdf)）

絶対圧力ゲージと加速度計は、たとえ超巨大地震やそれに伴う津波が発生しても計測値が振り切れないレンジを有している。それに加え、パロ社のナノ分解能処理エレクトロニクスによってフルスケール 1ppb（1 兆分の 1）の分解能を持たせる事が可能であり、水圧計ではフルスケール 1000m 単位のもので数マイクロメートル、3g フルスケールの加速度計では数ナノ g の値まで計測可能である。

## 地殻変動などの測地学的な計測システムとしての役割

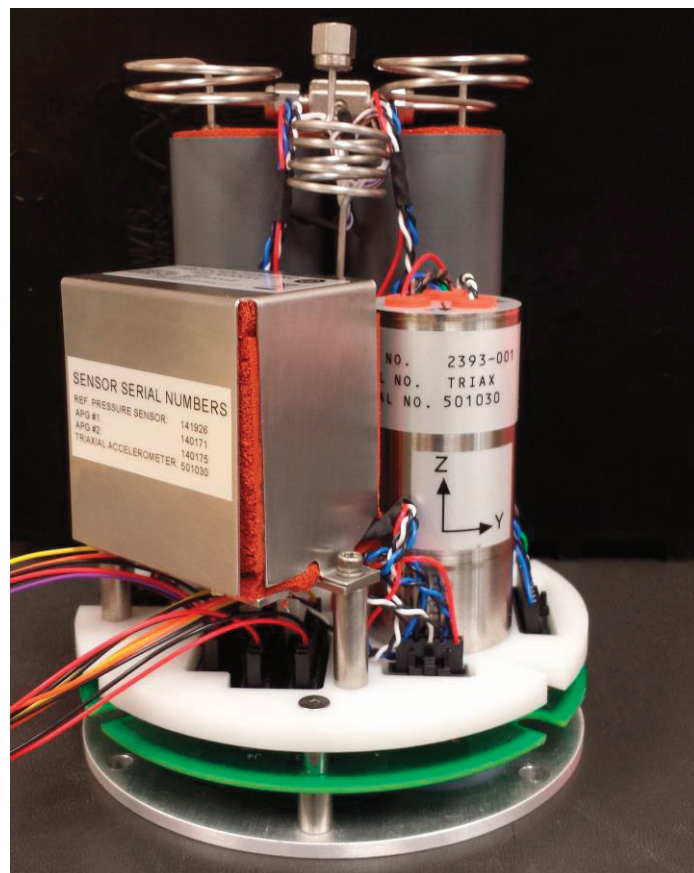
現在、海域においてより精密にスロースリップ現象や温暖化に伴う海上水位変化を測定できる測地学的装置・手法が必要とされている（詳しくは本書の最後に載せてある、最新の地球学的研究論文を参考の

こと)。また、地殻変動などの長期的な現象はセンサー自体の長期的ドリフトによって隠されてしまう事があるが、現在では「A-0-A」と呼ばれる現場校正方法が考案されており、絶対圧ゲージの長期的ドリフトを取り除くのに効果的である。

別資料（アプリケーションノート）にて詳細に解説してあるように、センサーのドリフトの原因は主に二つ有ると思われる。1 つ目はセンサーに圧力が掛かっていない場合に顕著になる水晶のガス剥離による上向きの（出力値が上昇する）ドリフト、そして 2 つ目はセンサーが加圧されている場合に顕著になるクリープ現象による下向きの（出力値が減少する）ドリフトである。この 2 つの現象によるドリフト量は時間経過と共に指数関数的（ $e$  状）に減少する。実際にはセンサーの総合的なドリフトはこの二つの現象が重なっているものと思われるため、センサーのドリフトは加圧履歴などにも左右されと考えられる。ドリフトは主にセンサーのスパンより(0)点のオフセットのみに影響するため、A-0-A 式現場校正法ではドリフトがどの現象に起因しているかに関わらずドリフト除去が可能である。

## SOS モジュールの構造

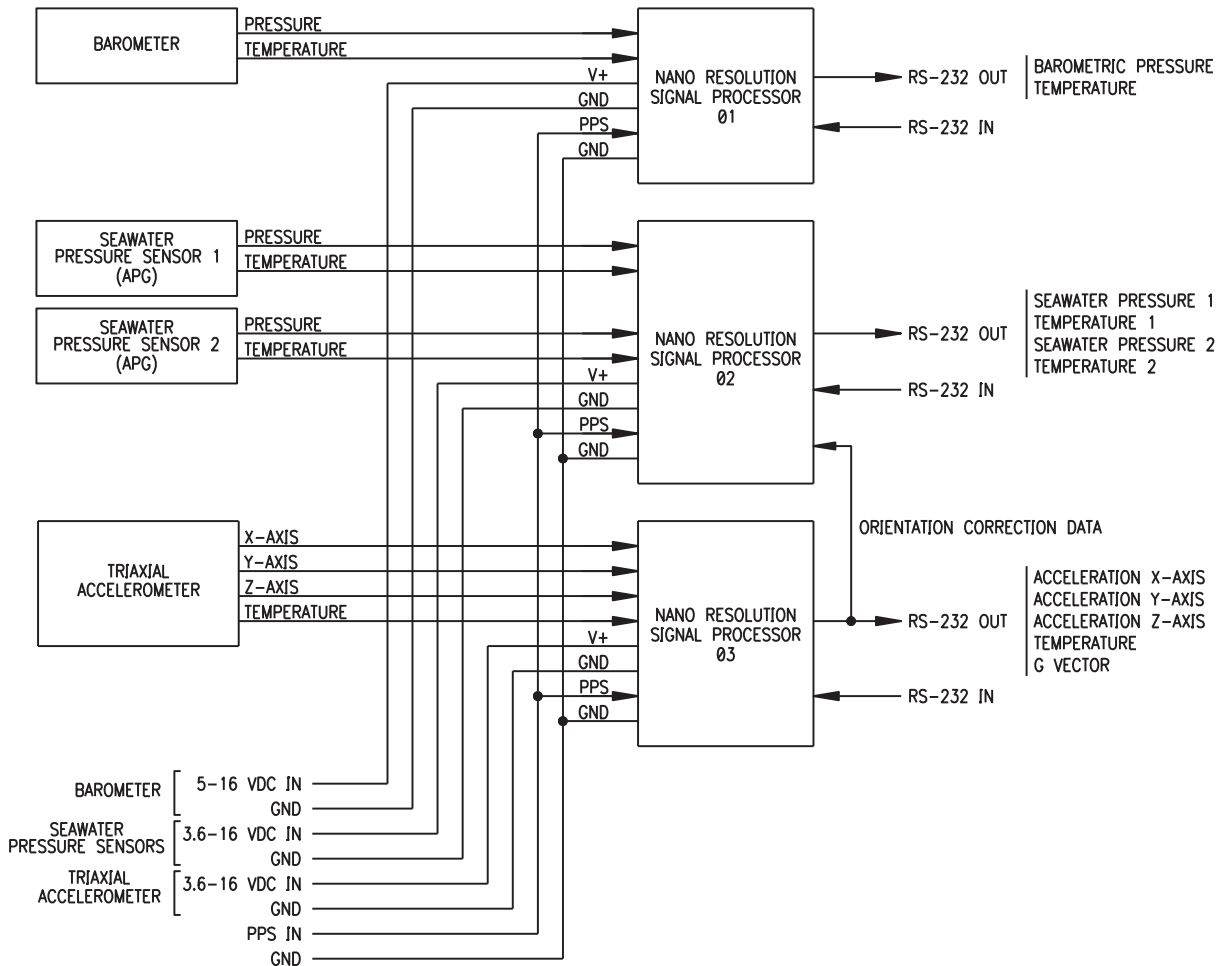
SOS モジュールに含まれるセンサーは次の通りである。絶対圧力ゲージ 2 台（フルスケールレンジは水位 700,1400,2000,3000,4000,7000m から選択可）、3 軸加速度計（アライメント補正付き）1 台、Digiquartz バロメーター（微気圧計）1 台、そして各センサー用のナノ分解能処理エレクトロニクス 3 つである。圧力伝播ラインは真空によってオイルで充満されており、3 方向のボールバルブに繋げることで海水圧力値（A）と筐体内の大気圧値(0)の間での切り替えが可能になる。



温度補正され、リニアライズされた **RS-232** 出力が、次のように各センサーから得られる。

- 2つの圧力計による海水圧力値 (**A**) と各センサー内の温度 (1 ポート)
- 3軸加速度計による **X,Y,Z** 各軸からの加速度及び **1G** のベクトル値と加速度計内の温度(1 ポート)
- バロメーター (微気圧計) による筐体内の大気圧値(**0**)と微気圧計内の温度(1 ポート)
- PPS インプットによる、全センサーの同期化とタイムスタンプ

## SOS Block Diagram

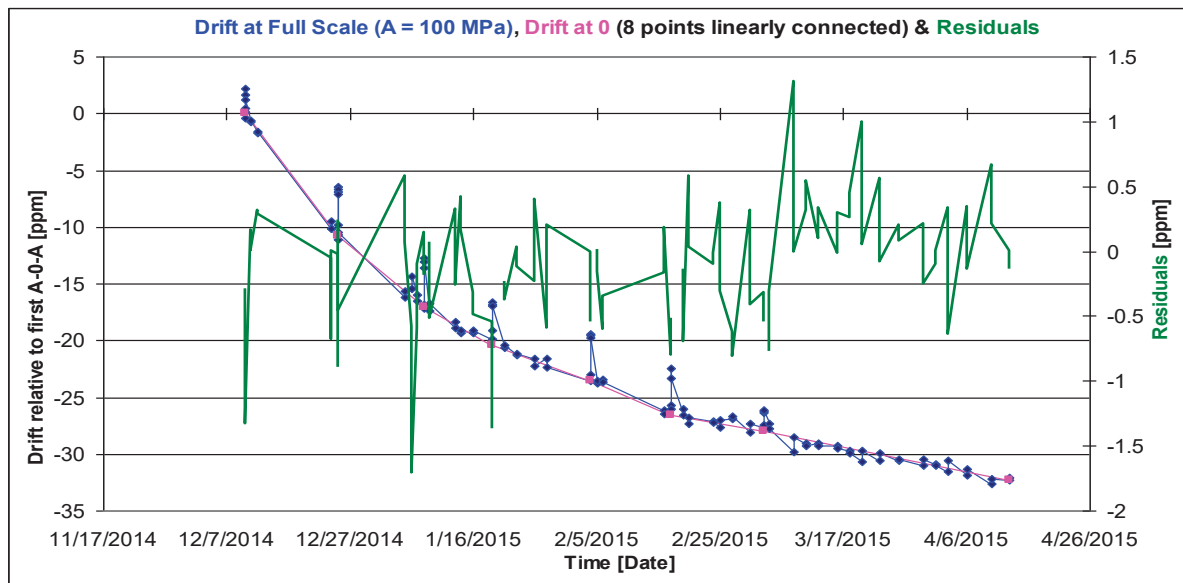


## 陸上ラボ試験における **A-0-A** カリブレーション手法評価の結果

**A-0-A** 方式ではバルブを用い、絶対圧力ゲージがさらされている圧力値を海水圧力値(**A**)とシステム筐体内の圧力値(**0**)の間で切り替えられるようにする。圧力値(**A**)の出力は、各校正点で筐体内の微気圧計を標準に用いて測定した(**0**)点のオフセットドリフトによって補正される。およそ3年間の陸上試験では、センサーのスパン(**A**)ドリフトは一次標準ピストンゲージ **DWT** を用いて計測された。

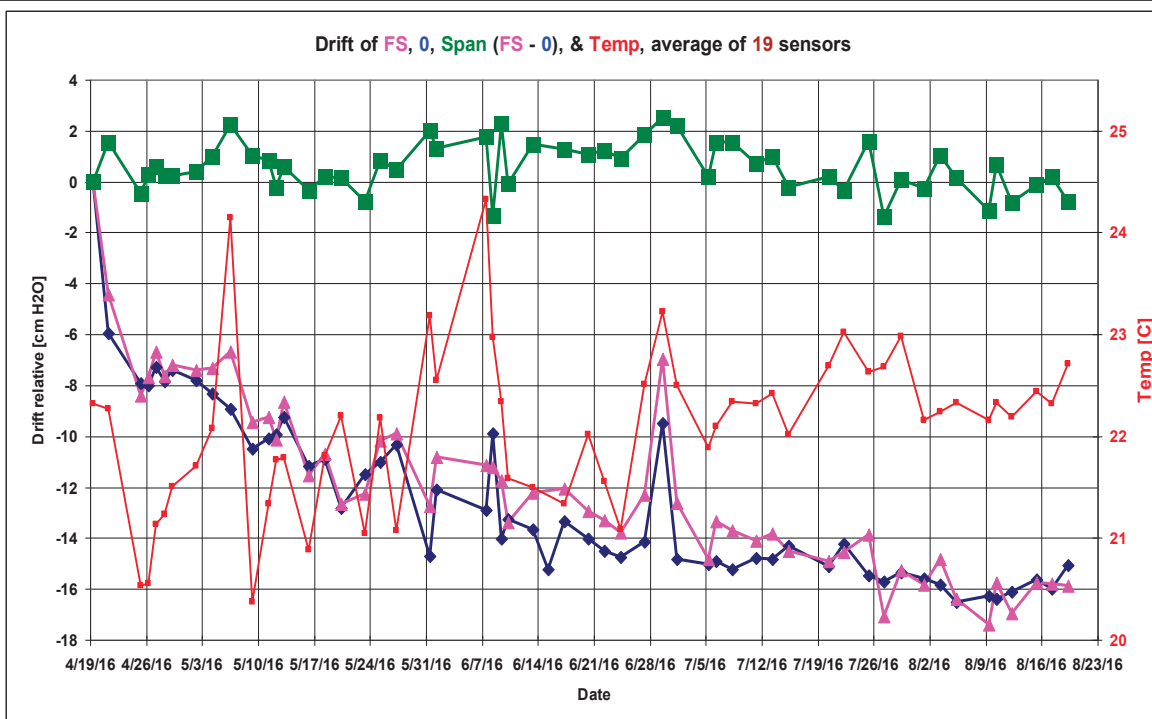
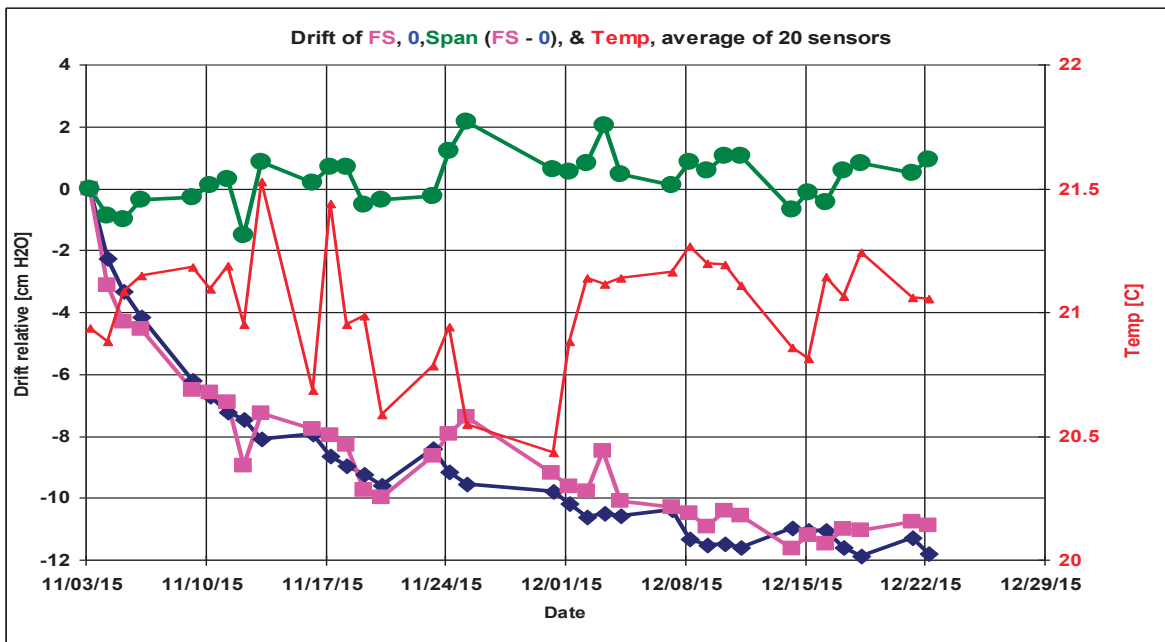
一次標準ピストンゲージを用いての **A-0-A** カリブレーションテクニックの最初の試験は産総研 (AIST) の計量標準総合センター (NMIJ) にて行われた。そこでは国際携帯標準機器 (transfer standard) とし

ての実績もあるフルスケール 100MPa（水位 10,000m）の高圧計 6 台の 0 値のドリフトを 7 年間ほど記録しており、0 値での長期ドリフトは上向きであった。そのセンサーを 100MPa の圧力で加圧し続けて長期ドリフト（4 ヶ月ほど）を計測すると、100MPa の圧力下でのセンサーのドリフトは下向きであった。しかし、加圧状態時のセンサーのドリフトは 0 値と A 値（フルスケール値）ではほぼ一致する値を示したので、DWT で計測する A（フルスケール）値のドリフトから 0 値でのドリフトを差し引くと、A 値のドリフトはバラつき 1ppm 程の平らなグラフになった。つまり、A0A 手法でスパンドリフトは 1ppm まで除去出来たと言える。下の図ではピンクの線グラフが 0 値でのドリフト、青の線グラフがフルスケール値でのドリフト、そして緑の線グラフが 2 つの差を取った物である。



その後 2 年間ほど、Paroscientific 本社でも 80 台ほどの圧力計（フルスケール水位 3000m）を用いて A-0-A テストが行われた。例えば 2015 年 11 月 3 日から 2015 年 12 月 29 日まで 20 台のセンサーがフルスケール圧力下で保持され、定期的な A-0-A 手法によってフルスケール A 値と 0 値のドリフトを計測した。その内の 19 台のセンサーはその後数ヶ月ほど大気圧に開放されたが、また 2016 年 4 月 19 日から 2016 年 8 月 19 日までフルスケール圧力下で A-0-A 測定が行われた。この 2 つの試験の結果、全センサーの平均的スパンドリフト（A 値のドリフトから 0 値のドリフトを差し引いた物）はバラつきが水位  $\pm 1.4\text{cm}$  で平らなグラフになった（この値は標準として使われた DWT の水位 3000m という圧力値における、 $\pm 5\text{ppm}$  の不確定さでもある）。下の図では、青のグラフがゼロ点での平均ドリフト、ピンクのグラフがフルスケール値での平均ドリフト、そして緑のグラフがその 2 つの差である。赤のグラフは試験中の 20 台のセンサーの温度である。

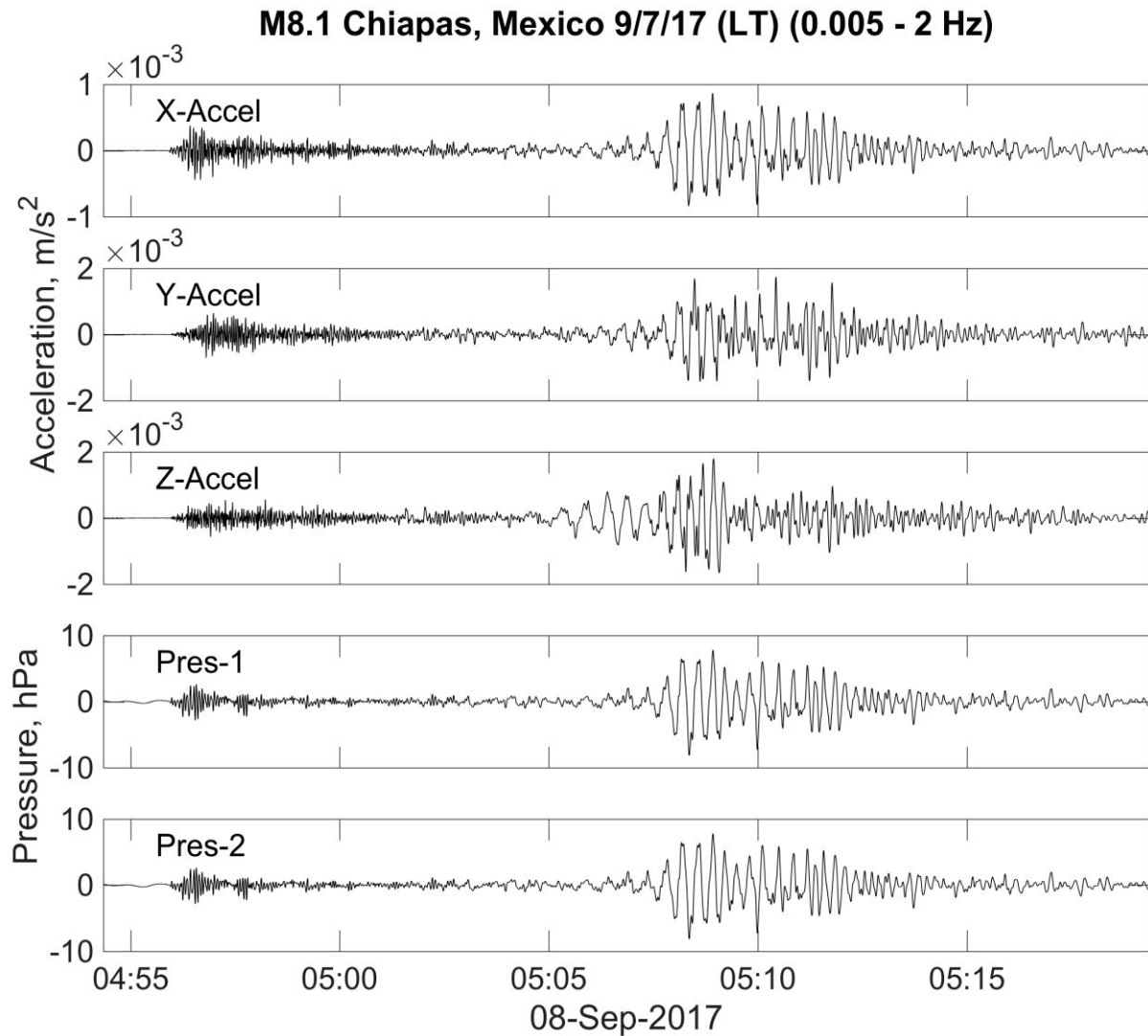




## SOS システムを用いた実海域での試験、モントレイ湾 Monterey Accelerated Research System (MARS)での結果

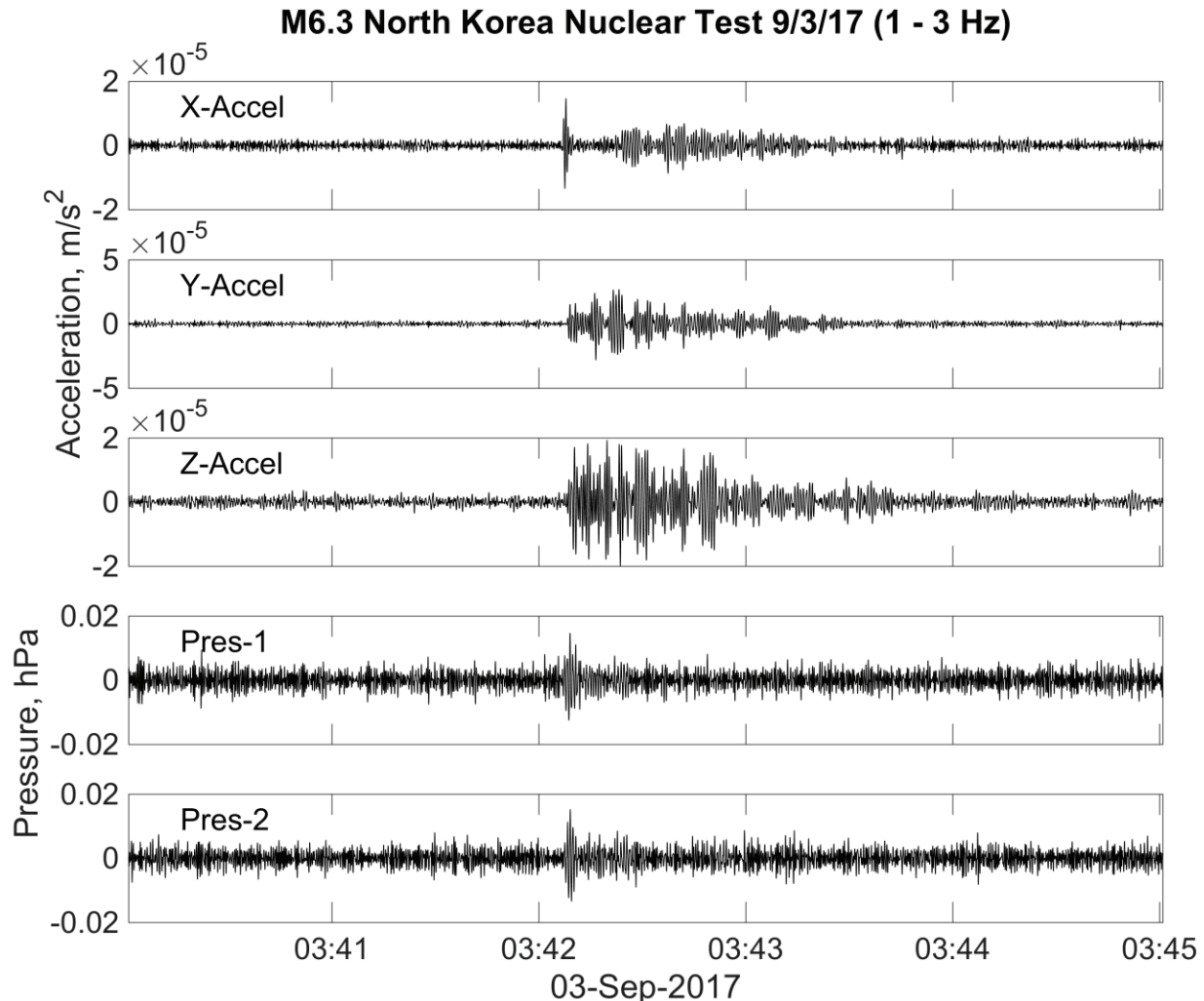
ワシントン大学 (University of Washington) の研究チームは 2017 年 6 月中旬に上記の SOS モジュールをカリフォルニア州モントレイ湾の Monterey Accelerated Research System (MARS)に展開し、海底での試験を始めた。

次のグラフは 2017 年 9 月 7 日にメキシコ・チアパス州で起きた M8.1 の地震によって発生した垂直・平行方向の加速度値、そして水圧変化である。



Plots Courtesy of the University of Washington

さらに、2017 年 9 月 3 日には北朝鮮が核実験を行ったと思われる振動が 9000km 離れたモンレー湾の SOS システムからも検出された。次のグラフに載せるように、この現象は 3 軸加速度計では各軸で 1 マイクロ g 単位の振動として現れ、絶対圧力ゲージではおよそ振幅 0.01hPa（水位 0.1mm）の水圧変化として現れた。

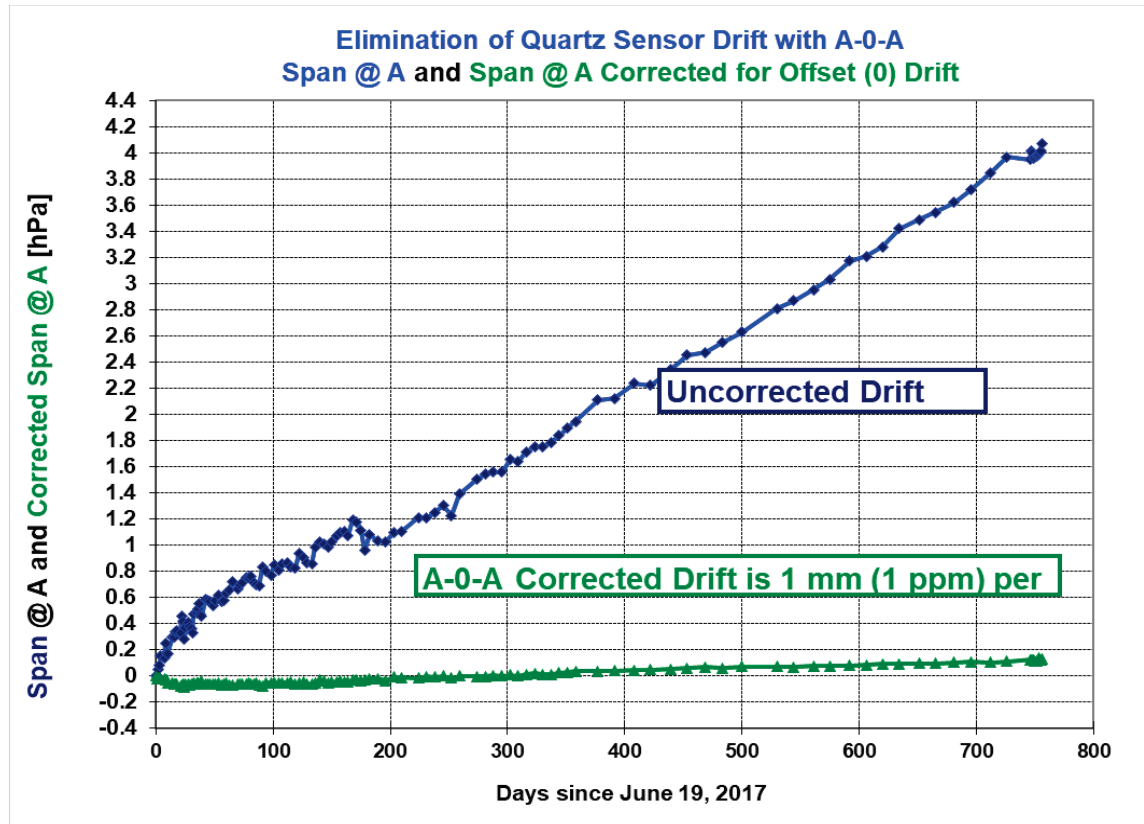


Plots Courtesy of the University of Washington

MARS 試験の主な目的は、A-0-A 現場校正方法が実海域でどれ程効果的に圧力センサーのドリフトを除去出来るかを確認する事であった。3 年間の陸上試験では一次標準であるピストンゲージ DWT を用いてスパン (A) のドリフトを定めたが、MARS でのワシントン大学の SOS 試験においては同期した 2 台の絶対圧力ゲージの差を取る事でスパンの安定性を求めた。

MARS 試験では、2 台の APG は定期的に海底圧力値(A)から筐体内部圧力(0)に切り替えられ、(0)点で 5 分間経過した後また(A)に切り替えられた。この最中約 4 分後の(0)値を 1 分間 (180-240 秒) 平均したデータから圧力計 P1、P2 を微気圧計で校正した (P1-Barometric), (P2-Barometric)と P1 と P2 の差を取ったものである(P1-P2)を求めた。この際、P1 と P2 の 0 点オフセットは異なる方向にドリフトしていた (2 台のセンサー間の相対的な(0)点ドリフト差 = 4.2 hPa である)。この様に求めた 0 点での 2 台のセンサー間の相対的ドリフトを、同じように海底圧力値(A)で 2 台の差を取る事によって求めた相対的ドリフトから差し引く事で、スパンの安定性を求めた。

結果として次のグラフに載せるように、海底圧力値（A）での 2 台のセンサー間の相対的ドリフトは 0 値でのドリフトデータを用いる事で、水位 0.1mm 単位まで除去された。2 年間ほどの試験で、標準偏差は 0.046 hPa（水位 0.46 mm）である。青のグラフが 2 台のセンサー間のフルスケール値(A)での相対的なドリフト、そして緑のグラフがそれから 2 台のセンサー間の(0)値での相対的なドリフトを差し引いた物である。



## まとめ

SOS システムは高分解能絶対圧力ゲージと 3 軸加速度計によって、海底での地震動や津波といった短期的な現象のより精密な計測を可能にする。また、バロメーター（微気圧計）も搭載し、システム筐体内の大気圧値（0）をリファレンスに絶対圧力ゲージのドリフトを精密に測定可能にする現場構成法である A-0-A も可能にする事で、これまで困難だった長期的な地殻変動や海面水位変化といった測地学的な計測も実現する。SOS モジュールは小型な総合システムであり、ケーブルシステムや海底観測システム（OBR）、そして ROV 等にも搭載可能である。現在では MARS サイトにてケーブルシステムとして機能しており、成果も出ているようなので、Paroscientific はこれからも SOS モジュールによる優れた地球学的計測センサーシステムの提供に尽力していく次第である。

## その他のアプリケーションノートへのリンク

- ドリフト根源に関するレポート  
[http://www.paroscientific.com/pdf/G8101\\_Root\\_Causes\\_of\\_Quartz\\_Sensors\\_Drift.pdf](http://www.paroscientific.com/pdf/G8101_Root_Causes_of_Quartz_Sensors_Drift.pdf)
- ドリフトへの数式モデルに関するレポート  
[http://www.paroscientific.com/pdf/G8095\\_Mathematical\\_Models.pdf](http://www.paroscientific.com/pdf/G8095_Mathematical_Models.pdf)
- センサードリフト除去のために考案された現場校正方法に関するレポート  
[http://www.paroscientific.com/pdf/G8097\\_Calibration\\_Methods\\_to\\_Eliminate\\_Sensor\\_Drift.pdf](http://www.paroscientific.com/pdf/G8097_Calibration_Methods_to_Eliminate_Sensor_Drift.pdf)



## 自然災害警告システム、測地学的研究に関する論文からの抜擢

2016 年度には災害警告システム、および長期的な測地学的観測に使われる現在の海底観測技術を記述した論文が多く発表された。以下に載せる抜擢された論文には、絶対圧力ゲージを使った津波警告システムやスロースリップ現象計測、及び 3 軸加速度計を用いた地震動計測や傾きの計測を記述しているものもある。

パロサイエンティフィックではこれまでに絶対圧力ゲージ、3 軸加速度計、加速度計、XY 傾斜計、そしてセンサードリフトを効果的に取り除く現場校正方法を開発している。これらを全て合わせれば、ダイナミックな地震動と水圧変化だけでなく、センサーのドリフトを取り除いた長期的な地殻変動（深度変化と傾斜）を一度に観察するセンサーシステムが実現可能である。

論文からの抜擢：

### Measuring slow slip offshore

Anne M. Tréhu *Science* 06 May 2016: <http://science.sciencemag.org/content/352/6286/654>

This has led to development of alternative techniques for obtaining seafloor geodetic data such as differencing of swath bathymetric data, seafloor and borehole strain meters, and arrays of absolute pressure gauges (APGs), which measure changes in the mass of overlying ocean, from which seafloor uplift or subsidence can be determined. Because of their relatively low unit cost, APGs can achieve the spatial coverage needed to understand complex environments, although there are a number of challenges to be overcome, including long-term sensor drift and separation of tectonic signals from oceanographic effects.

### Slow slip near the trench at the Hikurangi subduction zone, New Zealand

Laura M. Wallace, Spahr C. Webb, Yoshihiro Ito, Kimihiro Mochizuki, Ryota Hino, Stuart Henrys, Susan Y. Schwartz, Anne F. Sheehan *Science* 06 May 2016:  
<http://science.sciencemag.org/content/352/6286/701>

The range of fault slip behaviors near the trench at subduction plate boundaries is critical to know, as this is where the world's largest, most damaging tsunamis are generated. Our knowledge of these behaviors has remained largely incomplete, partially due to the challenging nature of crustal deformation measurements at offshore plate boundaries. Here we present detailed seafloor deformation observations made during an offshore slow-slip event (SSE) in September and October 2014, using a network of absolute pressure gauges deployed at the Hikurangi subduction margin offshore New Zealand. These data show the distribution of vertical seafloor deformation during the SSE and reveal direct evidence for SSEs occurring close to the trench (within 2 kilometers of the seafloor), where very low temperatures and pressures exist.

### Seafloor geodetic constraints on interplate coupling of the Nankai Trough megathrust zone

Yusuke Yokota, Tadashi Ishikawa, Shun-ichi Watanabe, Toshiharu Tashiro & Akira Asada *Nature* (2016)  
doi:10.1038/nature17632: <http://www.nature.com/nature/journal/vaop/ncurrent/full/nature17632.html>

Interplate megathrust earthquakes have inflicted catastrophic damage on human society. Such an earthquake is predicted to occur in the near future along the Nankai Trough off southwestern Japan—an economically active and densely populated area in which megathrust earthquakes have already occurred.

Megathrust earthquakes are the result of a plate-subduction mechanism and occur at slip-deficit regions (also known as ‘coupling’ regions where friction prevents plates from slipping against each other and the accumulated energy is eventually released forcefully). Many studies have attempted to capture distributions of slip-deficit rates (SDRs) in order to predict earthquakes. However, these studies could not obtain a complete view of the earthquake source region, because they had no seafloor geodetic data. The Hydrographic and Oceanographic Department of the Japan Coast Guard (JHOD) has been developing a precise and sustainable seafloor geodetic observation network in this subduction zone to obtain information related to offshore SDRs. Here, we present seafloor geodetic observation data and an offshore interplate SDR-distribution model. Our data suggest that most offshore regions in this subduction zone have positive SDRs. Specifically, our observations indicate previously unknown regions of high SDR that will be important for tsunami disaster mitigation, and regions of low SDR that are consistent with distributions of shallow slow earthquakes and subducting seamounts. This is the first direct evidence that coupling conditions might be related to these seismological and geological phenomena. Our findings provide information for inferring megathrust earthquake scenarios and interpreting research on the Nankai Trough subduction zone.

### **Tsunami data assimilation of Cascadia seafloor pressure gauge records from the 2012 Haida Gwaii earthquake**

Gusman, A. R., A. F. Sheehan, K. Satake, M. Heidarzadeh, I. E. Mulia, and T. Maeda (2016), *Geophys. Res. Lett.*, 43, doi: [10.1002/2016GL068368](https://doi.org/10.1002/2016GL068368).

Recent addition of pressure gauges to ocean bottom seismometers (OBSs) provides alternative data for tsunami forecast simulation. Because OBSs are usually deployed in a dense array, they provide high-density tsunami observations as well.

Here we use the tsunami waveforms recorded on the Cascadia OBS array to demonstrate two different approaches for tsunami forecast: (1) estimation of the fault slip distribution of the 2012 Haida Gwaii earthquake by tsunami waveform inversion and then forecasting the coastal tsunami heights by numerical forward modeling and (2) progressive assimilation of the tsunami waveforms recorded in the array, reproduction of wavefields in the vicinity of the array, and then forecasting of wavefields by numerical modeling.

The tsunami amplitudes recorded by the DPGs are less reliable than those recorded by the DARTs and APGs. Therefore, only 27 tsunami waveforms at DART and APG stations are used for waveform inversion.

The accuracy of the tsunami forecast strongly depends on the spatial distribution of the stations. A denser array would predict the wavefield between the stations both accurately and quickly, which in turn widens the lead time of an accurate forecast. Although the APG and DPG data during the 2012 Haida Gwaii tsunami were not transmitted in real time, our retrospective data assimilation demonstrates the capability of such a dense tsunami array to forecast an incoming tsunami. Real-time tsunami observation technologies, such as the cabled offshore dense tsunami array of S-net (about 150 stations spaced at 30–50 km intervals) that is being deployed in the Japan subduction zone, would provide data required for real-time tsunami forecasts using the methods presented in this paper.

The tsunami forecast from the tsunami data assimilation method produces similar results as those from the traditional tsunami-forecasting method which starts from a fault model. The tsunami data assimilation method that we present can be run continuously in real time and does not require a tsunami source

model. The method can be tested further for various configurations of tsunami source and coast to be implemented for future tsunami warning systems.

### **Connecting slow earthquakes to huge earthquakes**

Kazushige Obara\* and Aitaro Kato, *Science* 15 Jul 2016: Vol. 353, Issue 6296, pp. 253-257  
DOI: 10.1126/science.aaf1512, <http://science.sciencemag.org/content/353/6296/253> .

Slow earthquakes are characterized by a wide spectrum of fault slip behaviors and seismic radiation patterns that differ from those of traditional earthquakes. However, slow earthquakes and huge megathrust earthquakes can have common slip mechanisms and are located in neighboring regions of the seismogenic zone. The frequent occurrence of slow earthquakes may help to reveal the physics underlying megathrust events as useful analogs. Slow earthquakes may function as stress meters because of their high sensitivity to stress changes in the seismogenic zone. Episodic stress transfer to megathrust source faults leads to an increased probability of triggering huge earthquakes if the adjacent locked region is critically loaded. Careful and precise monitoring of slow earthquakes may provide new information on the likelihood of impending huge earthquakes.

If we can retrieve a precursory signal prior to a megathrust earthquake, it would be useful for disaster mitigation.

Slow earthquakes provide phenomenological evidence for the existence of a transition zone between locked and creeping zones proposed by thermal modeling studies and the partial release of slip deficit. In the past two decades, slow earthquakes have been detected in many subduction zones along the Pacific Rim. Among the various slow earthquake types observed along the Pacific Rim, ETS behavior in Cascadia is similar to that seen in Nankai; however, the scale of activity is much larger in Cascadia, where the ETS zone extends for 1200 km along the strike of the subducting plate and is divided into several segments.

Recently, seafloor pressure gauge observations revealed that the slip area of the SSE extends close to the (Hikurangi) trench.

Slow earthquakes with various time scales in and around the rupture area of the Tohoku earthquake had loaded the mainshock fault. A decade-long SSE took place in the deepest part of the Tohoku mainshock rupture area and accelerated over time. Near the mainshock rupture initiation point, SSEs were detected geodetically by seafloor pressure gauges in 2008 and 2011 in the vicinity of the high-slip area of the mainshock rupture zone.

Long-term monitoring of slow earthquakes is required so that a reliable picture of these phenomena can be built over all time scales, and so that physics-based numerical simulations that reproduce the observed plate boundary faulting behavior can be developed.

### **Sensing of upslope passages of frontal bores across the trench slope break of the Japan Trench**

Fukao, Y., H. Sugioka, A. Ito, H. Shiobara, J. M. Paros, and R. Furue (2016), *J. Geophys. Res. Oceans*, 121, doi:[10.1002/2015JC011432](https://doi.org/10.1002/2015JC011432).

The original purpose of our observations is to detect postseismic seafloor disturbances, including submarine landslides, in the epicentral region of the 2011 Tohoku-Oki. The observations are made with a free-fall/pop-up ocean bottom accelerometer (AOBS) and a free-fall/pop-up broadband ocean bottom seismometer (BBOBS). The AOBS contains a triaxial accelerometer developed by Quartz Seismic

Sensors, Inc., which uses quartz crystal resonators to convert the analog force inputs to digital outputs. The accelerometers have ranges of 20 m/s<sup>2</sup>, sensitivity in ppb, and a good long-term stability. They can measure strong earthquakes without clipping and can use the invariance of the Earth's 1 g gravity vector as a reference. The triaxial accelerometer senses both the acceleration change due to ground displacement and the component change of the 1 g gravity vector due to ground tilt. The former is dominant in the frequency range related to strong seismic waves, and the latter is dominant well below that range. The latter is the frequency range of our interest, where the root-mean-square (RMS) noise floor is below 10<sup>-8</sup> g. The three axes of the accelerometer are designed to be mutually orthogonal, and any small internal mechanical misalignments are corrected in the retrieved data using the alignment matrix table prepared by the factory. Using the alignment matrix allows accurate measurements of seismic signals and tilts on the decoupled orthogonal axes. The sampling rate is set at 1 Hz. In practice, the measured total acceleration value is not time invariant but decreases quasi exponentially through the observational period of 10 months. This decrease is due to the long-term drifts of the component sensors, but it is slow enough to ignore for the analysis of the transient events of our interest. The accelerometer contains an internal quartz crystal temperature sensor to compensate for thermal effects on acceleration. Even though there is a thermal time lag, the internal temperature is a good measure of external temperature changes.

**Excerpt from: An, C., Cai, C., Zheng, Y., Meng, L., & Liu, P. (2017). Theoretical solution and applications of ocean bottom pressure induced by seismic seafloor motion. *Geophysical Research Letters*, 44. <https://doi.org/10.1002/2017GL075137>**

Seismic signals captured by ocean bottom pressure sensors, which are designed to record tsunami waves, are largely ignored. In this paper, we derive a simple theoretical solution of the ocean bottom pressure as a function of prescribed seafloor motion. All the assumptions are clearly stated and analyzed. The solution is checked by comparing the seafloor displacement and pressure from three *M*<sub>7</sub>+ earthquakes, recorded by ocean bottom seismometers and pressure gauges located off the Japanese coast. We then show two applications. First, using the seafloor displacement data recorded by an ocean bottom seismometer, the pressure amplitude recorded by the associated pressure gauge is corrected, and vice versa. Second, pressure recordings from Deep Ocean Assessment and Reporting of Tsunamis during the 2011 Tohoku earthquake are converted to seafloor displacements, which are then utilized to estimate the earthquake focal mechanism. Thus, we demonstrate that seismic signals recorded by pressure sensors have great potential for fast estimate of earthquake source parameters.

**Excerpt from: Tolkova, E., Nicolsky, D., Wang, D. A Response Function Approach for Rapid Far-Field Tsunami Forecasting *Pure Appl. Geophys.* (2017) 174: 3249. <https://doi.org/10.1007/s00024-017-1612-0>**

Tsunami forecasting, in particular in application to ocean-wide seismically generated tsunamis, relies on numerical modeling for predicting the tsunami wave height and currents before the actual tsunami arrives at the coasts. Conventionally, the modeling solves an initial value problem with an estimated tsunami source function. At the same time, deducing the tsunami source presents a major challenge. Existing instruments do not directly measure the tsunami source—an initial displacement of the sea surface in the earthquake (EQ) area. Instead, the source has to be inferred from related data. The first-available land-based seismic and geodetic observations can provide for rapid warning for nearby coasts within a few minutes after the EQ, with more elaborated source products to follow (Melgar et al. 2016). The next available source estimate, produced by a technology termed W phase inversion of centroid moment tensor, uses measurements of long period (100–1000 s) seismic waves in the far field of the EQ. Since 2009, the Pacific Tsunami Warning Center (PTWC) routinely makes realtime tsunami forecasts taking the

focal mechanism from the W phase inversion and assuming a uniform slip on a rectangular fault (Foster et al. 2012; Wang et al. 2012). Seismogeodesy with near-source realtime GPS measurements (Crowell et al. 2012; Melgar et al. 2013; Titov et al. 2016a) can improve characterization of the fault geometry, but its applicability is limited to EQs occurring in the vicinity of dense GPS arrays. This sequence of early to relatively early available source models is used for estimating expected tsunami heights by coarsely defined ranges assigned to coastal zones (Melgar et al. 2016 and references therein).

Once a tsunami reaches open-ocean tsunameter stations, sea level measurements offer an attractive option to bypass the complexity of fault motions, and to reconstruct the tsunami source directly. Commonly, the source is assembled from pre-defined basis functions. It is assumed that hypothetical tsunamis radiated by these basis sources linearly superimpose in deep water. Then the basis sources/tsunamis are combined to achieve the best fit to the observations—a procedure termed source inversion. The resulting source is expected to further advance the accuracy of the forecast, which can now aim at predicting location-specific time-histories of wave elevation and currents.

製品に関するお問い合わせ

株式会社クローネ

〒124-0023 東京都葛飾区東新小岩3-9-6

電話：03-3695-5431 / FAX:03-3695-5698

URL:<https://www.krone.co.jp/paroscientific.html> (Paroscientific製品ページ)