

## セラミックス耐圧球を用いた超深海型自己浮上式海底地震計の開発

浅川賢一\*, 前田洋作\*, 尾鼻浩一郎\*\*, 渡邊佳孝\*, 寺田育正\*\*\*, 吉田政生\*\*\*\*,  
大久保直幸\*\*\*\*, 福地 鐵雄\*\*\*\*\*

### Development of a Super-deep-sea Self Pop-up Ocean Bottom Seismometer using a Ceramic Pressure-tight Housing

Kenichi Asakawa\*, Yosaku Maeda\*, Koichiro Obana\*\*, Yoshitaka Watanabe\*, Ikumasa Terada\*\*\*, Masao Yoshida\*\*\*\*,  
Naoyuki Okubo\*\*\*\* and Tetsuo Fukuchi\*\*\*\*\*

#### ABSTRACT

We have developed a Super-deep-sea self-popup Ocean Bottom Seismometer (SDOBS) that can be deployed to the ocean floor up to 9,000 m depth. Because the maximum applicable water depth of a conventional self-popup Ocean Bottom Seismometer (OBS) is 6,000 m, some areas have remained inaccessible to seismic surveys, such as the deep part of Japan Trench, where the Great East Japan Earthquake occurred in 2011. Using a ceramic pressure-tight sphere, we were able to develop a SDOBS that has almost identical size, weight, and buoyancy to those of a conventional self-popup OBS using a glass sphere. Regarding the acoustic transponder, which is a key device for the development of SDOBSes. We heighten the transmitting acoustic level of an existing acoustic transponder to raise the positioning accuracy. Detailed results of sea tests conducted to evaluate the acoustic transponder performance are described herein. We used the same built-in seismometers, recorders, batteries, and other equipment as those used for conventional OBSes. We also report that by improving the test procedures, we were able to heighten the measurement accuracy of the uniaxial compressive strength of ceramics, which are important parameters to determine the applicable hydraulic pressure. We have developed seven SDOBSes to date, and have deployed 18 SDOBSes cumulatively for seismic surveys in the Japan Trench and Ryukyu Trench.

#### 1. はじめに

日本周辺のプレート境界では、しばしば巨大地震が発生する。2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震はまだ記憶に新しい。このように海底下で発生する地

震の本質を理解し、防災に貢献するために、自己浮上式海底地震計（以下OBSと称する）を用いた海底下構造探査や地震観測が行われている。

このOBSは、母船から海中に投下されたのち、一定期間、内蔵の電池等を用いて地震観測を行い、データを内

---

+ 2013年3月7日受付 2014年7月22日受理  
\* 独立行政法人海洋研究開発機構海洋工学センター 〒237-0061 神奈川県横須賀市夏島町2-15  
Marine Technology and Engineering Center, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology  
2-15, Natsushima-cyo, Yokosuka-shi, Kanagawa 237-0061, Japan  
\*\* 独立行政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 〒236-0001 神奈川県横浜市金沢区昭和町3173番25  
Research and Development Center for Earthquake and Tsunami, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology  
3173-25, Showa-cho, Kanazawa-ku, Yokohama-shi, Kanagawa 236-0061, Japan  
\*\*\* 日本海洋事業株式会社 〒238-0004 神奈川県横須賀市小川町14-1 ニッセイ横須賀センタービル 8F  
Nippon Marine Engineering, Ltd.  
Nissei Yokosuka Center Building (8th Floor), 14-1, Ogawa-cho, Yokosuka-shi, Kanagawa 238-0004, Japan  
\*\*\*\* 京セラ株式会社 〒899-4396 鹿児島県霧島市国分山下町1-1  
Kyocera Corporation 1-1, Kokubuyamashita-cho, Kirishima-shi, Kagoshima 899-4396, Japan  
\*\*\*\*\* 株式会社SGKシステム技研 〒253-0065 神奈川県茅ヶ崎市松尾6-23  
SGK System Giken Co., Ltd. 6-23, Matsuo, Chigasaki-shi, Kanagawa 253-0065, Japan

蔵のレコーダに記録する。観測終了後に、母船から送られる音響指令信号により重錘を切り離し、水面に浮上し、回収される。

一般的に用いられているOBSでは、耐压容器として17インチ耐压ガラス球が用いられている。耐压ガラス球の内部には、3成分地震計、電池、レコーダ等が収容されている。そのほかにトランスポンダ、フラッシャー、ラジオビーコン、ハイドロフォン、重錘切り離し装置、重錘等が搭載されている。耐压ガラス球は、2個の半球状の殻を突き合わせて球状の耐压殻としたもので、自己融着テープで突き合わせ面をシールしている。耐压ガラス球はハードハットと呼ばれる合成樹脂製のカバー内に収容される。

この耐压ガラス球は比較的安価であるため、OBS以外にも多くの海中機器に利用されている。しかし、実用的最大水深が6,000 mであるため、東北地方太平洋沖地震を引き起こした日本海溝深部などに、海底地震探査の空白域が残っていた。

一方、セラミックスは金属と比較して高い一軸圧縮強度を持つとともに、腐食にも強く、比重も金属と同等程度であるなど、耐压容器の素材として必要な特長を兼ね備えている。Fig. 1は代表的なセラミックスと金属の一軸圧縮強度と引っ張り強度を比較したものである。この図に示したように、セラミックスは金属の数倍以上の一軸圧縮強度を持つ一方、引っ張り強度は圧縮強度の数分の一以下である。そのため、引っ張り応力や曲げ応力を低減することができれば、金属に比較して軽量で高強度の耐压容器を製作することができる。しかし、通常の耐压容器の設計方法では圧縮応力とほぼ等しい大きさの引っ張り応力が発生する。そのため、セラミックスは耐压容器の素材としてあまり利用されてこなかった。

セラミックス耐压容器の研究はStachiwによって1960年代に開始された(Stachiw, 2006)。その成果は、セラミックス浮力材(Weston et al. 2005, Stachiw et al.,

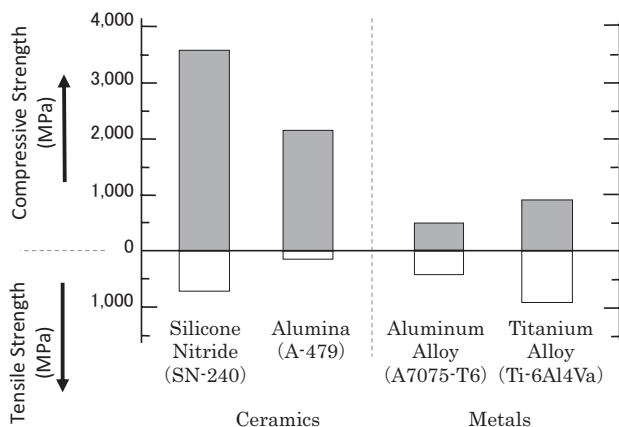


Fig. 1 Comparison of compressive strength and tensile strength of typical ceramics and metals

2005) や11,000 m級の水中ロボットNereus (Bowen et al., 2008) 用耐压容器 (McDonald, 2013) に活用されている。一方、国内ではYano et al. (2004, 2005) がセラミックス耐压球の研究を進めた。Asakawa等 (2012) はこの研究を引継ぎ、17インチの耐压ガラス球とほぼ同等の大きさと同重量を持ちながら、耐压が110MPaのセラミックス耐压球を開発した。

今回報告する超深海型自己浮上式海底地震計(以後、SDOBSと称す)は、このセラミックス耐压球を用いたものである。セラミックス耐压球の最大適応水深は11,000 mであるが、観測が想定される海域の水深が最大9,000 mなので、トランスポンダ等の最大適応水深は9,000 mとした。なお、SDOBSの概要はすでに報告している(Maeda et al., 2013)。本報告は、その内容を拡張したものである。

セラミックスの圧縮強さは、耐压球を設計する場合の基礎となる重要なパラメータである。その圧縮強さは、一般にはJIS R 1608に規定された一軸圧縮試験によって測定される。筆者らはその試験において、試料と荷重点の軸合わせ精度を高めることにより、その測定精度が高まることを見出した。2-1ではその測定方法と測定結果を報告する。

セラミックス耐压球の設計方法については、すでに報告しているが(Asakawa, 2012)、SDOBSを説明する上で重要な項目であるので、2-2でその概要を紹介する。

トランスポンダは、海底に投下したSDOBSの位置を計測するのに用いられるとともに、回収時には重錘を切り離すコマンドを受信するのに用いられる。最大9,000 mの水深において、高い測位性能とコマンド伝送性能を持つ必要がある。耐压容器とともにSDOBSの性能を左右する重要要素技術である。9,000 mの水深で利用可能なトランスポンダに関しては、すでに澤ら(2009)がOBSで用いられている10~15 kHz帯域を用いたトランスポンダを開発し、水深9,758 mでその応答を確認している。しかし、深海での測位性能については、まだ報告されていない。そこで本研究では、大水深における測位性能を高めるために、送信音圧を約2.5 dB高めた試作機を製作し、様々な評価試験を行った。まず、室内でその性能を確認したのち、平成23年3月に駿河湾沿岸で小型船を用いて性能評価のための実験を行った。さらに平成24年6月にJAMSTEC所有の研究調査船「かいれい」を利用して、水深3,300 mの海域でトランスポンダの試験を行ない、良好な結果を得た。3-1.ではその概要を説明し、3-2.から3-4.ではそれぞれ室内、小型船と「かいれい」による評価結果を報告する。

内蔵の地震計、レコーダなどの機器は、従来使用され

てきた既存品を用いた。また、ラジオビーコンとフラッシュャーも既存品を改造し、その耐圧性能を向上させた。その機能や形状、重量等には大きな変化がないので、本報告ではその改造内容や試験結果は割愛する。

これまでに、1台の試作機の他に6台のSDOBSを製作し、日本海溝と琉球海溝の地震探査に延べ18台運用し、データ取得に成功した。これまで設置した最大水深は7,448 mである。トランスポンダは最大直線距離12,900 mでの応答を確認した。これらの運用の概要を4.で報告する。

2. セラミックス耐圧球

2-1. 一軸圧縮強度の測定

セラミックスには多くの種類が存在する。本研究では、セラミックスの中でも比較的一軸圧縮強度と3点曲げ強度が高く、密度も低く、かつ直径400 ~ 500 mmの半球が製造可能な窒化珪素SN-240 (京セラ株) を素材として採用した。その主要仕様をTable 1に示す。圧縮強度はセラミックス耐圧容器の耐圧性能に直接関係するものの、その値は未知であったため、筆者らは一軸圧縮試験を行ない、その一軸圧縮強度を測定した。

Fig. 2はその一軸圧縮試験機の概要を示したものである。試料の形状は、直径5 mm、長さ12.5 mmの円柱とした。試料を立方体の高張力鋼製アンビルで挟み、

Table 1 Principal characteristics of the silicone-nitride ceramics SN-240

Item	Unit	Value
Density	kg/m <sup>3</sup>	3.3x10 <sup>3</sup>
Water Absorption	%	0
Three-point Bending Strength	MPa	1,020
Young's Modulus	GPa	300
Poisson Ratio		0.28

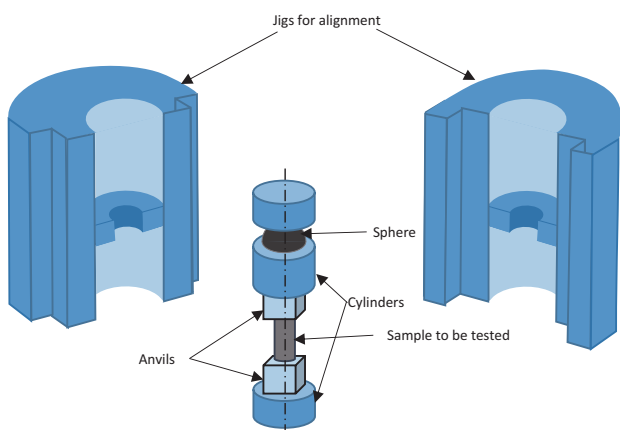


Fig. 2 Apparatus of the uniaxial compression test and the tool for arrangement

0.5 mm/min の速度で加圧した。これらの試験条件はJIS R 1608によるものである。上部のアンビルには球と円柱を介して荷重が加えられる。この球と圧縮装置の接点、つまり荷重点が試料の中心軸延長線上にないと、試料の内部に曲げモーメントが発生する。セラミックスの引っ張り強度は圧縮強度の十分の一程度なので、この曲げモーメントにより破壊する可能性が生じる。そこで、筆者らは荷重点と試料の中心軸を一致させるように、Fig. 2に示す軸合わせ用治具を作成した。半割の軸合わせ用治具で試料やアンビルと円柱を挟み込むことで、これらの中心軸を一致させている。目視により軸合わせを行った場合と軸合わせ用治具を用いた場合の測定結果をTable 2に示す。また、その一軸圧縮強度の累積分布をFig. 3に示す。セラミックスは脆性材料であるため、その強度は確率的な分布をする。サンプル数はそれぞれ10と9である。軸合わせ用治具を用いることにより、目視で軸合わせを行った場合と比較して、測定値が約20%高まった。一軸圧縮強度の測定精度が向上したと言える。

2-2. 水中コネクタ貫通孔の設計

OBS用耐圧容器には、水中コネクタ用の貫通孔が開けられている。これらの水中コネクタは、耐圧容器内部の電池回路と、耐圧容器の外に固定された重錘切り離し装置やトランスポンダ用送受波器を接続する。このような貫通孔の周辺には応力集中が発生することが知られている。たとえば、直交する応力が働く薄い平板に開いた孔の周辺には、2倍の応力集中が生じる(西田)。この応力集中を緩和するため、筆者らは貫通孔周辺の補強部の肉厚を厚くした。

Fig. 4は耐圧球の断面を示したものである。Asakawa et al (2012) は有限要素法により応力解析を行い、補強

Table 2 Results of the uniaxial compression test

Method	Visual Alignment	Alignment with a tool
Uniaxial Compressive Strength (GPa)	2.594	4.137
	2.695	3.947
	2.771	3.642
	2.894	3.428
	2.983	3.413
	3.028	3.352
	3.029	3.642
	3.084	3.481
	3.184	3.584
	3.603	
Average	2.986	3.625
Standard Deviation	0.284	0.262

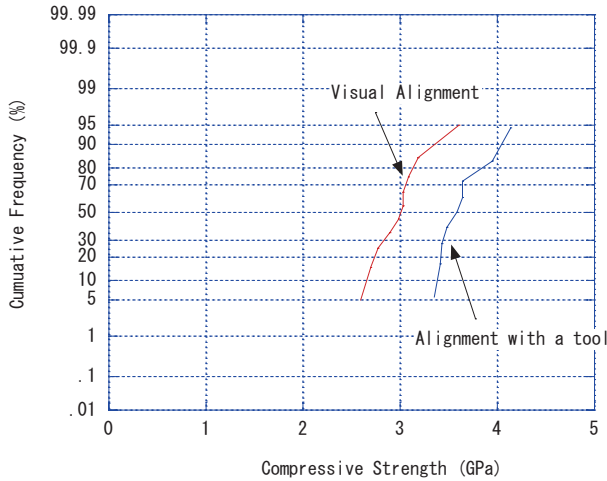


Fig. 3 Cumulative distribution of uniaxial compressive strength of alumina ceramics

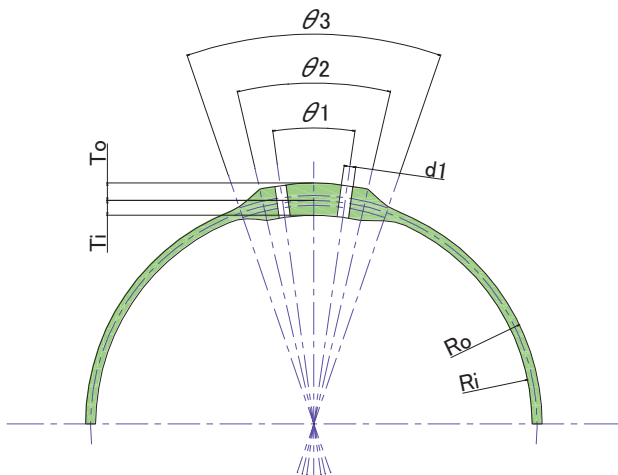


Fig. 4 Cross section view of the ceramic pressure-tight hemi-sphere  
 $R_i=213$  mm (inner radius of the ceramic hemi-sphere),  $R_o=223$  mm (outer radius of the ceramic hemi-sphere),  $T_i=14.4$  mm (thickness of the inner reinforcement),  $T_o=17.1$  mm (thickness of the outer reinforcement),  $d_1=11.5$  mm (diameter of the through-hole),  $\theta_1=16^\circ$ ,  $\theta_2=26^\circ$ ,  $\theta_3=38^\circ$

部の設計方法を示した。Fig. 5は貫通孔と補強部周辺の応力分布の解析結果の一例で、Fig. 5 (a) は最小主応力の分布を、Fig. 5 (b) は最大主応力の分布を示したものである。水圧は110 MPaとした。この水圧は、世界の海洋の最深部であるマリアナ海溝最深部の水深に相当する。最大主応力の極大値は42 MPaでSN-240の3点曲げ強度から変換した引っ張り強度726 MPaより小さい。最小主応力の極大値は貫通孔下部と補強部の付け根に生じる。補強厚さ $T_i$ を厚くすると貫通孔下部の応力集中が緩和されるが、補強部付け根の応力は増大する。補強厚さ $T_o$ を厚くすると、その逆に貫通孔下部の応力集中が増大し、補強部の付け根の応力は緩和する。Asakawa et al. (2012)はこの貫通孔下部の応力集中と補強部付け根の応力集中をともに一定の値以下にする設計方法を見

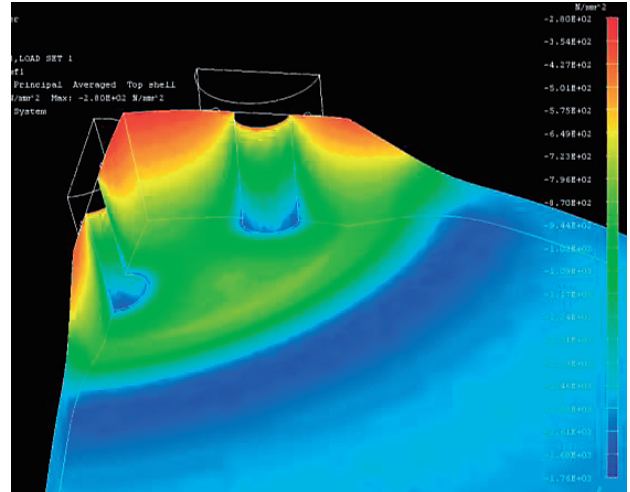


Fig. 5 (a) Example of contour of the calculated minor principal stress.

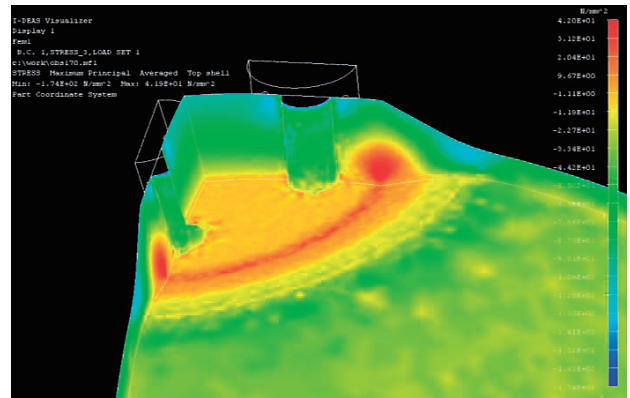


Fig. 5 (b) Example of contour of the calculated major principal stress.

出し、補強部の形状を最適化した。Fig. 4のモデルはこのようなして最適化されたものである。その最小主応力の極大値-1.76 GPaは一軸圧縮試験で測定した一軸圧縮強さ平均値-3.62 GPaの約1/2であり、十分な安全率を持っていると考えられる。なお、球殻内面に生じるフープストレスの理論値は1.56 GPaで、一軸圧縮強さの約1/2.3である。さらに、Asakawa et al. (2012)は外径100 mmの小型セラミックス耐圧球を制作し、繰り返し加圧試験や長期加圧試験を含む水圧試験を行い、その設計方法を検証した。

Table 3 (Maeda et al., 2013)は開発したセラミックス耐圧球と17インチ耐圧ガラス球の主要緒元を比較した  
 Table 3 Comparison of the developed ceramic pressure-tight sphere and a conventional 17 inch glass sphere

Item	Unit	Ceramic Sphere	Glass Sphere
Outer Diameter	mm	445	432
Inner Diameter	mm	426	404
Weight	kg	20.4	17.7
Volume	litter	46.6	42.2

ものである。17インチ耐圧ガラス球とほぼ同等の外径と浮力を持っていることが確認できる。

### 3. トランスポンダ

#### 3-1. トランスポンダの概要

開発したトランスポンダは、海洋研究開発機構所有の研究調査船で利用できるようにするため、周波数やコマンドフォーマット等は、既存のOBS用トランスポンダと共通にした。Table 4にその周波数割り当てを示す。コマンドは32ビット長のFSK信号で、100 msの間隔で2 msのパルスを送信する。従って、信号の長さは3.2秒である。1回の送信動作で、この3.2秒の信号を3回繰り返して送信する。

既存のOBS用トランスポンダは、独立した耐圧容器に収容されている。本研究では、トランスポンダの電子回路をセラミックス耐圧容器内に組み込むことにより、トランスポンダ用耐圧容器を削除し、全体システムを軽量化し、浮力を増加した。送受波器は、水中コネクタを介して、セラミックス耐圧容器内の電子回路と接続する。電子回路と送受波器の写真をFig. 6に示す。

#### 3-2. 室内試験による評価

Fig. 7とFig. 8に試作した送受波器の受信感度指向性(11.5 kHz, 13.0 kHz)と送信音圧の指向性(13.5 kHz)を示す。いずれも270°~360°(0°)~90°の範囲で、ほぼフラットな指向性を有している。また、質問信号に対して

Table 4 Frequency assignment of the acoustic transponder

	Frequency (kHz)
Command (FSK)	10.5, 11.5
Interrogation	13.0
Reply	13.5, 14.0, 14.5

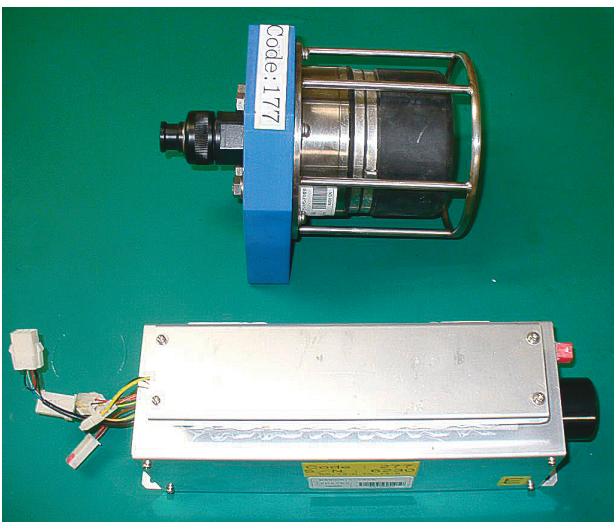


Fig. 6 Photograph of the acoustic transponder

する最小受信音圧と送信音圧(13.5 kHz)の測定値はそれぞれ74.5 dB re  $\mu\text{Pa}$  ( $\theta = 0^\circ$ )と196.9 dB re  $\mu\text{Pa}$  at 1 m以上 ( $-90^\circ < \theta < 90^\circ$ )であった(Table 5)。正面の方向を0°としている。

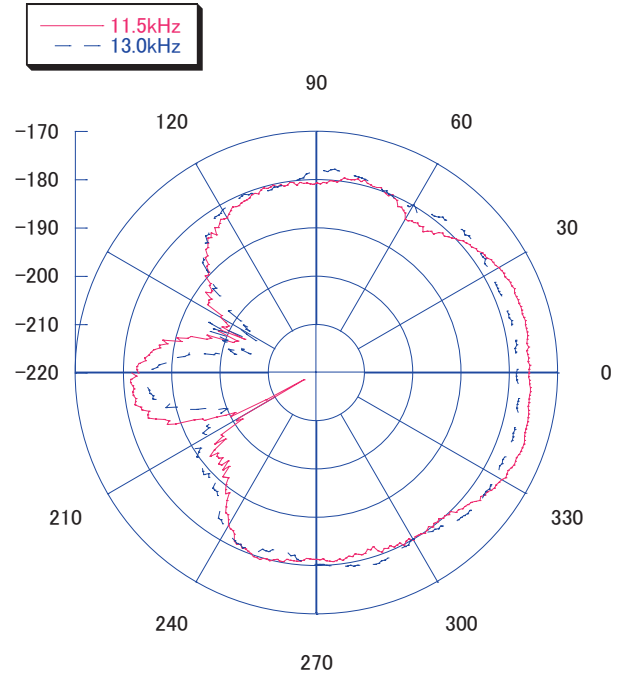


Fig. 7 Receiving directivity of the transducer  
Unit: dB re  $\mu\text{Pa}$

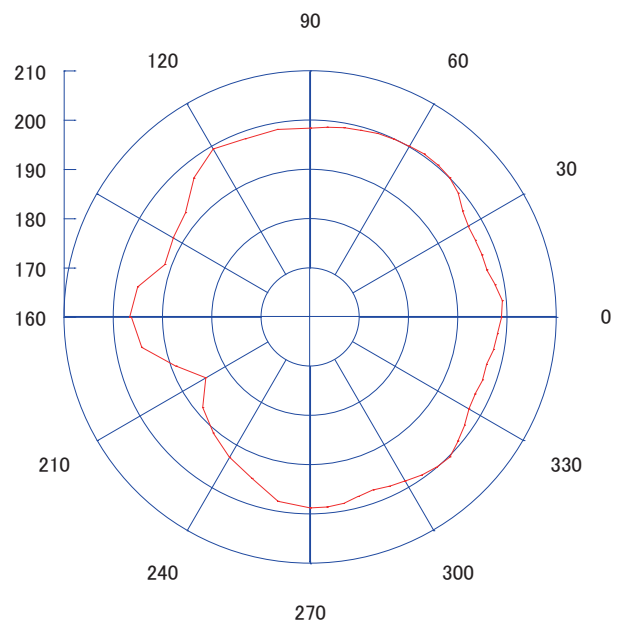


Fig. 8 Transmitting directivity of the transducer  
Unit: dB re  $\mu\text{Pa}$  at 1 m

Table 5 Acoustic pressure of the acoustic transponder

	Frequency (kHz)	Test Result (dB re $\mu\text{Pa}$ at 1 m)
Transmission Level	13.5	196.9 ( $-90^\circ < \theta < 90^\circ$ )
Minimum Receiving Level	13.0	74.5 ( $\theta = 90^\circ$ )

適応最大水深の拡大に伴い、伝搬距離と伝搬損失が増大する。必要な最大伝搬距離を、9,000 mの海底に設置したトランスポンダを俯角60度で測位する場合の直線距離に相当する10,400 mと仮定すると、拡散損失は  $20\text{Log}_{10}(10,400)=80.3$  dBとなる。質問信号周波数13.0 kHzにおける吸収損失を、後述する方法により、13.1 dBと仮定すると、全伝搬損失は、93.4 dBとなる。質問信号に対する最小受信音圧は74.5 dB re  $\mu\text{Pa}$ なので、母船から送信する信号の音圧は167.9 dB re  $\mu\text{Pa}$  at 1 m (13 kHz) 以上が要求される。また、同様な方法で、応答信号周波数13.5 kHzにおける全伝搬損失を94.3 dBと仮定する。送信音圧は196.9 dB re  $\mu\text{Pa}$  at 1 m (13.5 kHz) 以上なので、母船の最小受信音圧は102.6 dB re  $\mu\text{Pa}$ 程度以下が必要とされる。実際の運用には、さらにマージンを取る必要がある。

吸収損失に関しては、Francois and Garrison (1982-a, 1982-b) の式により、次のように求めた。まず、この式の有効範囲である水深3,500 mまでは水深100 m毎に吸収損失を求め、数値積分を行った。水深3,500 m以深は水深3,500 mでの吸収損失で代表した。なお、3,500 m以上の水深では、吸収損失はさらに小さくなるものと考えられる。その他のパラメータは、 $\text{ph}: 8$ 、塩: 35 ppt、水温:  $4^{\circ}\text{C}$ とした。水温が大きい範囲では、吸収損失はさらに小さくなる。

### 3-3. 小型船による沿岸実験での評価

このトランスポンダの性能を評価するために、まず小型船により沿岸で予備的な試験を行ない、その後JAMSTECの海洋調査船「かいらい」により大水深での試験を行った。

Fig. 9は沿岸における試験の概要を示したものである。トランスポンダは、セラミックス耐圧球に組み込み、水深約100 mの海底に設置した。母船は水平方向に

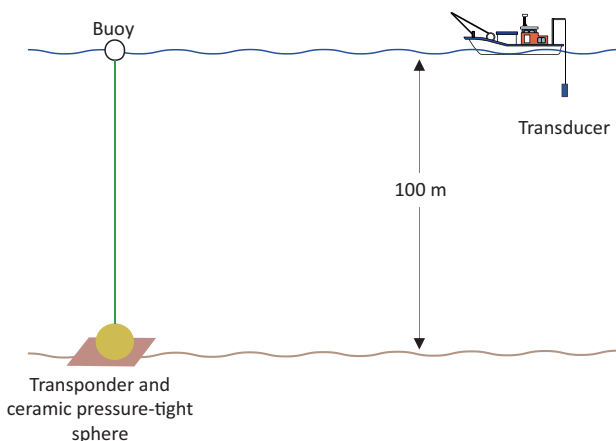


Fig. 9 Shore-test scheme of the acoustic transponder using a small boat

移動して、船底から下げたコマンドの送受波器より測位用の質問信号と重錘切り離し用コマンドを送信し、その応答の有無を確認した。コマンドは、コマンドと質問信号の送信機能とコマンドに対する返答の受信機能を持っている。また、質問信号に対する応答から、トランスポンダとコマンドの送受波器間の距離を計測し表示することができる。トランスポンダの方位を検知する機能はない。Table 6に距離の計測結果と重錘切り離しコマンドへの応答状況を示す。トランスポンダの応答周波数は13.5 kHzに設定した。重視切り離しコマンドは9,000 mまで、測位用質問信号に対しては10,000 mまで送受が可能であることが確認できた。試験した水深が100 mと浅いため、水平方向の伝搬であること、水面と海底間のマルチパスの影響が考えられること、雑音の影響が深海より大きいこと、コマンドの性能も影響することから、実際の利用状況とは条件が異なる実験ではある。しかし、基本的な性能を確認することができ、次節の「かいらい」による試験の準備が整った。

### 3-4. 「かいらい」による大水深での評価

平成24年6月にJAMSTEC 所有の研究調査船「かいらい」を利用して、水深3,300 mの海域でトランスポンダの試験を行った。実験ではトランスポンダをセラミックス耐圧球に組み込み、母船のウインチを使って水深2,966 mまで吊りおろし、コマンドへの応答確認や受信

Table 6 Results of shore-test of the acoustic transponder

Horizontal Distance (m)	Measured Slant Distance (m)	Response against Command
6,000	5,983	Good
	5,995	
	6,036	
7,000	6,926	Good
	6,976	
	6,982	
	No Response	
	7,033	
8,000	7,932	Good
	7,979	
	7,988	
9,000	8,958	Good
	8,963	
	No Response	
	8,989	
	9,077	
10,000	9,972	No Response
	No Response	
	No Response	
11,000	9,993	No Response
	No Response	



Fig. 10 Photograph of the acoustic transponder and the ceramic pressure-tight sphere being hung from KAIREI

信号のS/N等の測定等を行った。Fig. 10は「かいいい」から吊り下ろす時のセラミックス耐圧球とトランスポンダの写真である。試験は水深6,000 m以上の海域で計画したが、海象条件が悪かったため、水深3,300 mの海域で実施した。

まず、質問信号音圧のマージンについて報告する。トランスポンダの水深は2,966 mとし、母船から送信した測位用の質問信号に対する応答を確認した。質問信号の送信音圧は、相対的に 0 dBから30 dBまで 6 dB間隔で変えることができるので、その送信音圧を変えてマージンを評価した。試験の結果、最小の送信音圧でも応答があることが確認された。すなわち質問信号の送信に関しては、30 dB以上のマージンがある。伝搬距離を10,400 mとした場合、拡散損失と吸収損失がそれぞれ10.9 dBと9.0 dBの計19.9 dBの損失増加が加わる。確認されたマージンはこの値以上である。なお、3,000 m以深の吸収損失は1.21 dB/kmと仮定した。この値は、周波数：13.0kHz、水深：3,000 m、pH：8、水温：4℃、塩分：35 pptとしてFrancois and Garrisonの式により求めたものである。

また、「かいいい」の質問信号の最大送信音圧は、前述した室内試験から推定された必要とされる送信音圧167.9 dB re  $\mu$ Pa at 1 mを約30 dB上回る。

Table 7 Response against acoustic command

Water Depth (m)	Relative Transmission Level dB	Response	Command Type
2966	+6	No Response	INACTIVATE
2966	+12	No Response	INACTIVATE
2966	+18	No Response	INACTIVATE
2966	+18	No Response	INACTIVATE
2966	+18	No Response	RELEASE
2966	+24	Good	RELEASE
2966	+1	No Response	RELEASE
2966	+24	No Response	RELEASE
2966	+30	No Response	RELEASE
2966	+24	Good	RELEASE
2966	+24	Good	ACTIVATE
2966	+18	Good	RELEASE
2966	+12	No Response	ACTIVATE
2763	+18	Good	ACTIVATE
2723	+12	No Response	ACTIVATE
2681	+12	Good	ACTIVATE
2611	+6	Good	ACTIVATE
2513	+0	No Response	ACTIVATE
2449	+0	Good	ACTIVATE
2370	+0	Good	INACTIVATE
2290	+0	Good	ACTIVATE

Command Type

- INACTIVATE：トランスポンダをスリープ状態にする
- ACTIVATE：トランスポンダをスリープ状態から起動する
- RELEASE：重錘を切り離す

次に、切り離しコマンドとactive/inactive コマンドを母船から送信し、その応答を確認した。その結果、Table 7に示すように、水深2,449 mにおいて、相対的送信音圧 0 dBで応答があった。相対的送信音圧の最大値は30 dBであるので、水深2,449 mにおいては、30 dB以上のマージンがあるものと推定できる。質問信号の場合と同様に、このマージンは、伝搬距離が10,400 mに増加した場合の伝搬損失の増加より大きい。

しかし、水深を2,966 mにすると、相対的送信音圧+18 dB未満では応答が確認できなかった。このようにわずかな深度の増加で必要な送信音圧が増加する原因として、海底からの反射の影響と、近くに存在する海山からの反射の影響が考えられる。Fig. 11に示すように、実験海域のそばには水深2,800 m前後の海山が存在する。コマンドは信号長が3.2秒と長いので、周囲の海山からの反射波の影響を受けることが考えられる。

最後に、母船で受信した応答信号の波形の一例をFig. 12に示す。トランスポンダの応答周波数は13.5 kHzに設定した。トランスポンダの水深は、2,966 mであった。信号は、デジタルレコーダ (NF: EZ7510, 100 kSamples/s, 16 bits) を用い記録した。

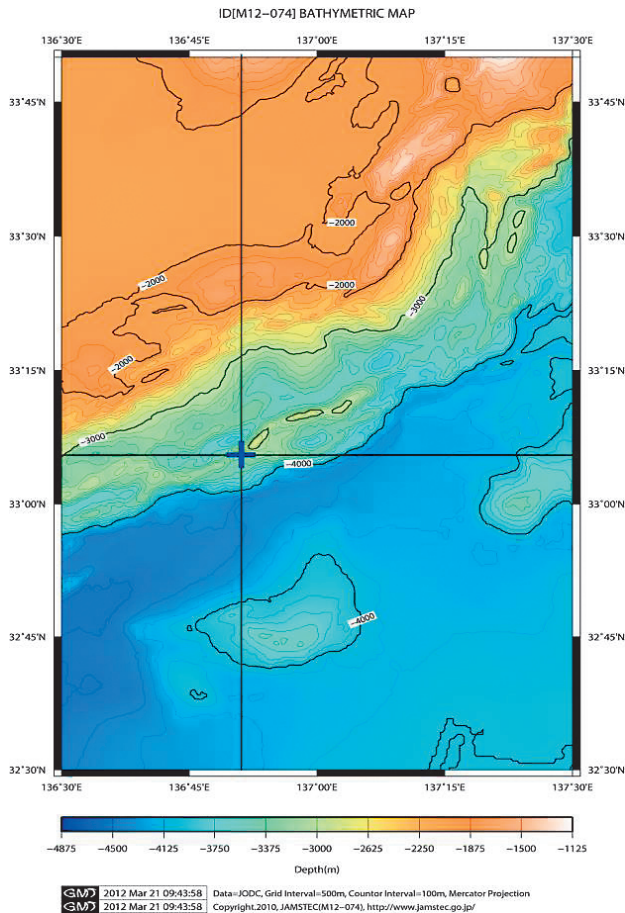


Fig. 11 Bathymetric map of the transponder test site

この受信信号のS/Nは31.8 dBで、ノイズの周波数帯域は13～18 kHzである。この信号をモニタしたポイントのさらに後段に通過帯域幅500 Hzの狭帯域フィルタが挿入されているので、さらに10 dB程度S/Nが改善され、42 dB程度のS/Nが見込まれる。伝搬距離を10,400 mとした場合には、9 dBの吸収損失増加と11 dBの拡散損失増加の合計20 dBの伝搬損失増加が見込まれる。この損失増加分を差し引いて、22 dB程度のS/Nが得られるものと推定できる。S/Nの観点からは、十分な伝送能

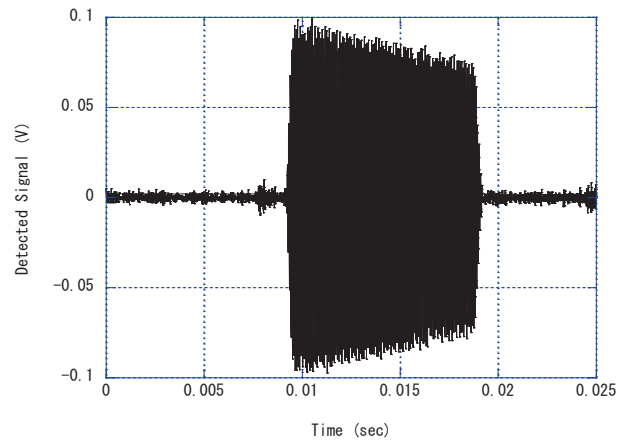


Fig. 12 Example of the received acoustic signal

力があると言える。

母船での受信信号のノイズレベルは海象条件や周囲の海底地形にも依存するので、この試験結果だけから測位可能な最大伝搬距離を推定することは難しい。しかし、後述するように条件が良い場合、「かいいい」により最大直線距離12,900 mで質問信号に対する応答を確認している。

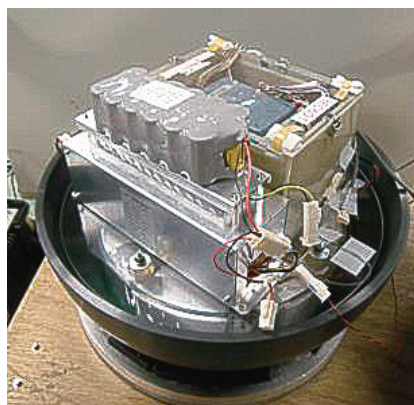
#### 4. 運用状況

完成したセラミックス耐圧球とSDOBSの写真をFig. 13に示す。2012年12月 (Obana et al.) と2013年1月には「かいいい」による調査航海KY12-20とKY13-01において開発したSDOBSによる海底地震探査を初めて行った。約6,300 m～7,450 mの日本海溝軸にのべ7台設置し (Fig. 14の赤丸)、良好なデータを取得した。また、2013年8月と11月には日本海溝と南西諸島海域においてそれぞれSDOBS 6台 (Fig. 14の白丸) と5台を使用した調査を行なった。

Fig. 15は海底に設置したSDOBSの測位点と測位時の「かいいい」の位置関係を示した一例である。水深は7,320 mである。「かいいい」はSDOBSに北西方向から



(a) Ceramic housing



(b) Instruments mounted in the ceramic housing



(c) Whole device

Fig. 13 Photograph of the SDOBS



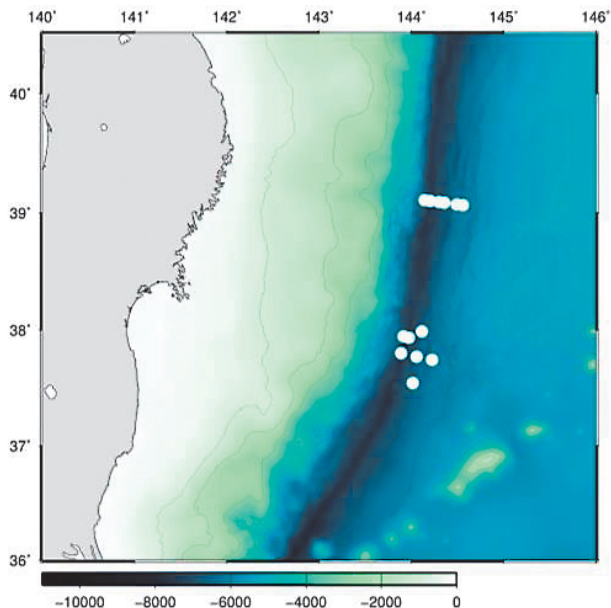


Fig. 14 Observation site using SDOBSes  
 South sites: Dec. 2012 and Jun. 2013 (red circles)  
 North site: Aug. 2013 (white circles)

接近し、直上を通り過ぎたところでSDOBSが浮上を開始している。図のSDOBS は浮上を開始するまでの測位点をプロットしたものである。測位点の水平面内のばらつき標準偏差は58.9mであった。なお、平均位置からの距離が標準偏差の2倍を超す3点（図中の白抜き丸）を除いた場合（図中の赤丸）の標準偏差42.5mである。この値は水深の0.6%に相当する。

Table 8は「かいいい」の調査航海KY12-20とKY13-01において質問信号に対してトランスポンダが応答した最大直線距離を示したものである。応答する距離は付近の海底地形や海象条件に依存するが、最大で12,900mの距離から応答することが確認された。これまで設置した最大水深は7,448mであるが、水深9,000mでも十分適応することが可能と考えている。

下降速度、浮上速度はそれぞれ80, 57 m/min程度であり、従来のOBSとほぼ同じ結果となった。

回収後のセラミック球には、耐圧ガラス球で良く見ら

Table 8 Deployment site depth and Maximum slant range when responding to interrogation

Site	Depth (m)	Maximum slant range when responding to interrogation (m)
38	7,320	11,000
39	6,739	12,900
40	6,320	9,500
JMT22	6,725	9,100
JMT23	6,816	8,280
JF1	6,925	7,533
JF2	7,448	9,700

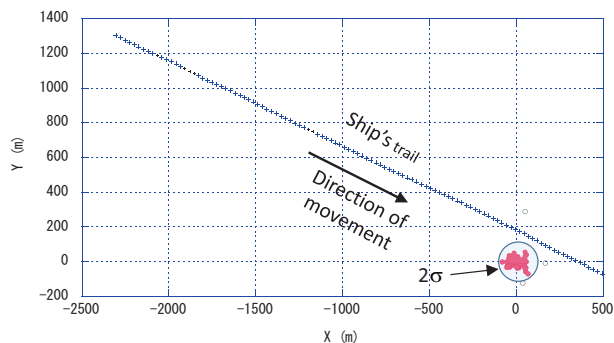


Fig. 15 Variation of the located SDOBS and the ship's trail  
 Crosses: ship's trail  
 Red and black circles: location of the SDOBS  
 Blue circle:  $2\sigma$  ( $\sigma=43$  m)

れるすり合わせ面の欠けや剥離等の損傷は一切見当たらず、高い信頼性を持つことが確認された。なお、セラミックス耐圧容器の水圧試験（最大で110 MPa）でも、すり合わせ面の欠けや剥離等の損傷は発生していない。

5. おわりに

海底の地殻構造探査や地震活動の調査に多くのOBSが利用されている。しかし、耐圧容器として使用されている耐圧ガラス球の実用的最大利用水深が6,000mであるため、日本海溝深部などに観測の空白域があった。一方、セラミックスは、耐圧容器の素材として重要な高い圧縮強度と耐食性を持っているが、引っ張り強度が圧縮強度の十分の一程度であるため、耐圧容器の素材としてあまり利用されてこなかった。そこで筆者らは、セラミックス耐圧球を用いたSDOBSを開発した。

本報告では、まず、セラミックス耐圧球の設計に必要なパラメータである一軸圧縮強度の測定方法について、軸合わせ用治具を用いることにより測定精度が20%程度向上することを示した。さらに、セラミックス耐圧容器設計方法の概要を紹介した。トランスポンダに関しては、深海での測位性能を高めるため、既存トランスポンダの送信音圧を高め、室内試験や沿岸試験、海洋試験により、その性能を確認した。コマンドや質問信号、応答信号の音圧と受信信号のS/Nに関しては、10,400mの伝搬に対して、十分なマージンを持っていると考えられる。しかし、小型船と「かいいい」での実験結果が示唆するように、コマンドに関しては、信号長が数秒以上と長いため、海象や周囲の海底からの反射波の影響を受ける可能性が考えられる。この点は、今後の課題として残されている。

これまでに、1台の試作機を含めて7台のSDOBSを製作し、日本海溝（3航海）と南西諸島海域（1航海）の地震探査に延べ18台運用し、データ取得に成功した。

これまでに設置された最大水深は7,448 mである。トランスポンダについては、最大で12,900 mの距離から応答することが確認された。水圧試験や実際の海底での観測において、セラミック球には耐圧ガラス球で良く見られるすり合わせ面の欠けや剥離等の損傷は一切見当たらず、高い信頼性を持つことが確認された。

開発したSDOBSにより、地震探査の空白域をほぼ解消することができるようになった。今後は、Shimizu et al.が開発した小型OBSの技術を組み込むことにより、小型軽量化することができる。

セラミックスは球型耐圧容器だけでなく、円筒あるいは俵型の耐圧容器にも利用することができる。筆者らもセラミックス円筒と金属製半球蓋を組み合わせた簡易な構造を持つ耐圧容器を提案し、基礎的な研究を進めている(Asakawa et al., 2013)。今後さらにセラミックス円筒を用いた耐圧容器の開発を進め、実用化したいと考えている。

セラミックスの圧縮破壊のメカニズムや確率分布、信頼性の評価方法については、まだ十分に解明されているとは言い難い。今回は、セラミックスの一軸圧縮試験において、軸合わせの精度を高めることにより、測定精度が向上することを報告した。測定精度をさらに高めるとともに、その破壊メカニズムと破壊確率分布を明らかにすることにより、設計基準と信頼性をより明確にすることができると考えられる。今後も、セラミックスの破壊について、基礎的な研究を進める予定である。

#### 謝辞

トランスポンダの開発に当たり、ご指導ご助言を頂いたJAMSTECの越智寛氏に深謝いたします。また、トランスポンダの海洋実験でご支援いただいた主席研究者の田中隆氏、船長の鮫島耕児をはじめとする乗組者方々に深謝いたします。さらに、本論文をまとめるに当たってご指導を頂いた(株)SGKシステム技研の尾崎俊二氏と清水良次氏に深謝いたします。

#### 引用文献

澤隆雄, 青木太郎, 大澤弘敬, 井上朝哉, 田原順一郎, 伊藤和彰, 吉田弘, 石橋正二郎, 渡邊佳隆: 超深海11,000m級トランスポンダ, *J. Marine Acoust. Soc. Jpn.*, Vol.36, No. 1, pp.26-32, 2009.  
 西田正孝: 応力集中, 森北出版, 1973.  
 前田洋作, 浅川賢一, 尾鼻浩一郎, 寺田育正: セラミックス耐圧容器を用いた超深海型海底地震計の実用化, 海洋調査技術学会第25回研究成果発表会講演

要旨集, pp24-25, 2013.  
 Asakawa, K., T. Hyakudome, M. Yoshida, N. Okubo, M. Ito and I. Terada: Ceramic Pressure-Tight Housings for Ocean-Bottom Seismometers Applicable to 11-km Water Depth, *IEEE J. of Oceanic Eng.*, Vol. 37, No. 4, pp756-763, 2012.  
 Asakawa, K., Y. Maeda, T. Hyakudome, M. Yoshida and N. Okubo: Small-sized model for Pressure-tight Ceramic Housings with an Elongated Ceramic Cylinder, *Proc. of OCEANS' 13 MTS/IEEE Bergen*, 2013.  
 Bowen, A. D., et al.: The Nereus Hybrid Underwater Robotic Vehicle for Global Ocean Science Operations to 11,000m Depth, *Proc. of OCEANS' 08 MTS/IEEE KOBE-TECHNO-OCEAN ' 08*, 2008.  
 Francois, R. E. and G. R. Garrison: Sound absorption based on ocean measurements. Part I: Pure water and magnesium sulfate contributions, *J. Acoust. Soc. Am.* 72, 896-907, 1982-a.  
 Francois, R. E. and G. R. Garrison: Sound absorption based on ocean measurements: Part II: Boric acid contribution and equation for total absorption, *J. Acoust. Soc. Am.* 72, 1879-1890, 1982-b  
 Maeda, Y., K. Asakawa, K. Obana and I Terada: Super-deep-sea Ocean Bottom Seismometers Using Ceramic Spheres, *Proc. of International Symposium on Underwater Technology 2013*, 2013.  
 McDonald, G., Operations to 11,000m: Nereus Ceramic Housing Design and Analysis, *Proc. of OCEANS' 13 MTS/IEEE San Diego*, 2013.  
 Obana, K., S. Kodaira, Y. Nakamura, T. Sato, G. Fujii, T. Takahashi, and Y. Yamamoto: Aftershocks of the December 7, 2012 intraplate doublet near the Japan Trench axis, *J. of Earth, Planets and Space*, to be published.  
 Shimizu, S., T. Kimura, I. Terada, Y. Watanabe M. Ito, K. Hatakeyama and N. Takahashi: A new generation of ocean bottom seismometer for 3 D-grid extensive observation, *Proc. OCEANS 2012 MTS/IEEE Yeosu*, 2012.  
 Stachiw, J. D. : Ceramic external pressure housings for deep sea vehicles, *Proc. of OCEANS '06 MTS/IEEE Boston*, 2006.

- Stachiw, J. D., and D. Peters : Alumina Ceramic 10in Floatation Spheres for Deep Submergence ROV/AUV Systems, Proc. of OCEANS 2005 MTS/IEEE Washington, 2005.
- Weston, W., J. Stachiw, R. Merewether, M. Olsson and G. Jemmott : Alumina Ceramic 3.6in Floatation Spheres for 11km ROV/AUV Systems, Proc. of OCEANS '05 MTS/IEEE Washington, 2005.
- Yano, Y., and S. Takagawa: Study on Spherical Pressure Vessel of ceramics for Deep-sea Buoyancy Module Applications, Proc. of OCEANS'04 MTS/IEEE/TECHNO-OCEAN'04, 2004.
- Yano, Y. and S. Takagawa: Exploratory Study on Engineering Ceramics Pressure Hulls for Deep-Sea Submergence Services," Marine Technology Society journal, Vol.39, No.3, pp.49-55, 2005.

#### アブストラクト

9,000 mの水深で利用可能な超深海型自己浮上式海底地震計を開発した。従来の自己浮上式海底地震計の最大適用水深は6,000 mだったので、東北地方太平洋沖地震を引き起こした日本海溝深部などに、海底地震探査の空白域が存在していた。セラミックス耐圧球を用いることにより、サイズ、重量、浮力は従来のガラス耐圧球を用いた海底地震計とほぼ同じで最大水深が9,000 mの自己浮上式海底地震計を実現することができた。超深海型自己浮上式海底地震計開発のキーデバイスの一つであるトランスポンダに関しては、既存トランスポンダをベースに、その測位精度を高めるように送波音圧を大きくした。本報告では海洋におけるその評価試験の結果を報告する。内蔵の地震計、レコーダなどの機器は、従来使用されてきた既存品を用いた。また、耐圧性能を決定する重要なパラメータの一つである一軸圧縮強度の測定精度を改善することができたので、報告する。これまでに、7台の超深海型自己浮上式海底地震計を製作し、日本海溝と琉球海溝の地震探査に延べ18台運用し、データ取得に成功している。

