

— 自律型新方式海底地震計の開発試験に向けた — 深海用小型ビデオカメラの開発

塩原 肇^{*†}・杉岡裕子^{*}・太田豊宣^{***}・大西信人^{***}

Development of a Compact Deepsea Video Camera for Testing the New Autonomous Ocean Bottom Seismometer Development

Hajime SHIOBARA^{*†}, Hiroko SUGIOKA^{**}, Toyonobu OTA^{***} and Nobuhito ONISHI^{***}

Abstract

The ERI's broadband ocean bottom seismometer (BBOBS) of a free-fall and self pop-up type has been used since 1999. As the BBOBS is located on the seafloor, the large BBOBS housing is affected by the bottom current, the noise level of horizontal component is higher than that of the land stations. To avoid this problem, a BBOBS with a penetrator sensor (BBOBS-NX) was developed in 2009, which requires the aid of a remotely operated vehicle (ROV) in deployment and recovery. Although the data quality becomes better, the chance of observations is less. Therefore, the new type, autonomous type BBOBS-NX is expected. But there was a problem of large tilt at landing on the seafloor in about 50 % of trials, which exceeded the acceptable limit of the broadband sensor used. At the start of the development for the new autonomous type BBOBS-NX (NX-2G), it is necessary to understand how and when the tilt at landing of the BBOBS-NX occurred without disturbing its behavior. For this purpose, we made two small underwater instruments that can be attached outside of the BBOBS-NX to enable the retrieval during its deployment by using the ROV. One of them is the deep-sea video camera (DSCAM) that can be used to watch the landing of the BBOBS-NX, and another is the Micro-Electro-Mechanical-System (MEMS) acceleration logger to measure the tilting of the BBOBS-NX during its descent in the water. In this paper, we focused on the development and results of the DSCAM. It has been used three times already in real operations and played the original role. Moreover, it also worked to monitor operations of the autonomous deployment of the NX-2G.

Key words : Broadband ocean bottom seismometer, Penetrator, Video camera, High pressure test, Sapphire crystal glass, LED

はじめに

地球科学, 特に固体地球物理学的に興味深い現象の多く, 例えば海洋底拡大, 沈み込みに伴う地震発生・火山帯の形成などは, 地球表面の 2/3 を占める海域がその重要な舞台や鍵となる. 陸域で発展してきた地震観測は, 1960 年代以降, 次第に海底でも可能とすべく多くの努力が払われて

きた. この四半世紀ほどでは, 遠地震・長周期地震動を観測するため広帯域海底地震観測が国際的に始まり (例えば, Collins *et al.*, 2001; Suetsugu and Shiobara, 2014), その中でも日本は先進的な成果を挙げてきている (末次・塩原, 2020). そのため, 広帯域海底地震計 (BBOBS) を開発, その機能高度化を継続的に図り (図 1), 更に, 自由落下によって海底へ広帯域地震センサー部を貫入させることで雑音低減させるもの (BBOBS-NX) を実用化した (Shiobara *et al.*, 2013). 但し, BBOBS-NX の運用には潜水艇による作業を要するため, 観測機会や海域を著しく制限してしまう問題がある. そこで, 潜水艇での作業を不要とする, 自律動作が可能な新方式の BBOBS-NX である NX-2G の開発を 2015 年に本格的に開始した.

本著では, この開発に先立ち, 既知の問題点の実態を把

2020 年 9 月 11 日受付, 2020 年 10 月 13 日受理.

[†] shio@eri.u-tokyo.ac.jp

^{*} 東京大学地震研究所海半球観測研究センター

^{**} 神戸大学海洋底探査センター

^{***} 有限会社テラテクニカ

^{*} Ocean Hemisphere Research Center, Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

^{**} Kobe Ocean-Bottom Exploration Center, Kobe University

^{***} TIERRA TECNICA Ltd.

握するために独自開発した、深海用小型ビデオカメラ (Deep-Sea video CAMera; DSCAM: 塩原ほか, 2016) について、その機器開発の経過と運用結果を紹介する。

開 発 目 的

前述の BBOBS-NX では、図 2 に示すように、海面からの投入時は広帯域センサーが内在するセンサー部と直径 65 cm のチタン球容器からなる記録部を一旦固定し、海底まで自由落下させ、海底面へセンサー部が貫入することを狙う。降下速度は毎分 90 m 弱である。着底位置を海上の複数点からの音響トランスポンダーによる距離測定を元に精密決定した後、無人潜水艇による作業で記録部を分離し、センサー部から約 2 m 離して設置する。2009 年から 2012 年にかけて 15 回ほどの投入をした結果では、着底時のセンサー部 (記録部も一体) での傾斜が大きく、使用している広帯域センサーが許容可能な ± 8 度を超えてしまう事例が約半数で発生した (図 3)。これらの場合には無人潜水艇がその場にいたので、傾斜を補正することが可能であったが、新規開発する自律動作方式の NX-2G では許容範囲内の傾斜で着底させる必要がある。しかし、その時点では、この着底時の傾斜が発生する原因は、水中を降下している際の傾斜変動または静的傾斜が保存されているのか、海底面の不均質さによるのか、それら以外の要因なのか、全く不明であった。

2015 年に科研費の採択を受け、NX-2G の開発を本格的に開始するにあたり、この着底時の傾斜発生を正確に理解した上で対策を考え出すことを最初の課題とした。

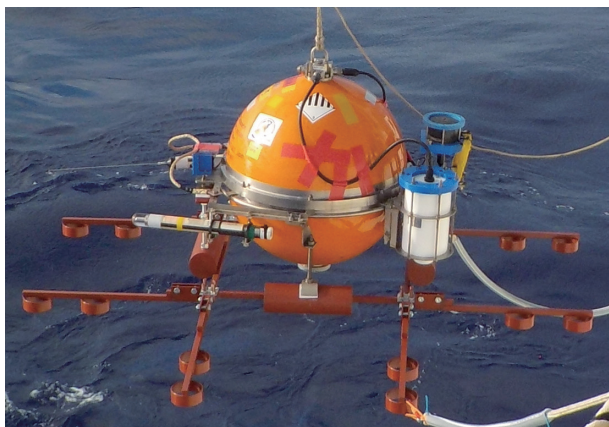


図 1. BBOBS の外観

2020 年現在での標準的仕様である、自己浮上型の広帯域海底地震計 (BBOBS) の投入直前の様子。白い円筒部は精密差圧計 (DPG) である。オレンジ色の耐圧容器は直径 65 cm のチタン合金製。最大使用水深は 6000 m である。容器内部には、CMG-3T 広帯域センサーが専用のレベリング装置に搭載され、刻時標準を内蔵したデータレコーダー・音響トランスポンダー・電池などが入っている。現在は最長 2 年間の連続観測が可能である。

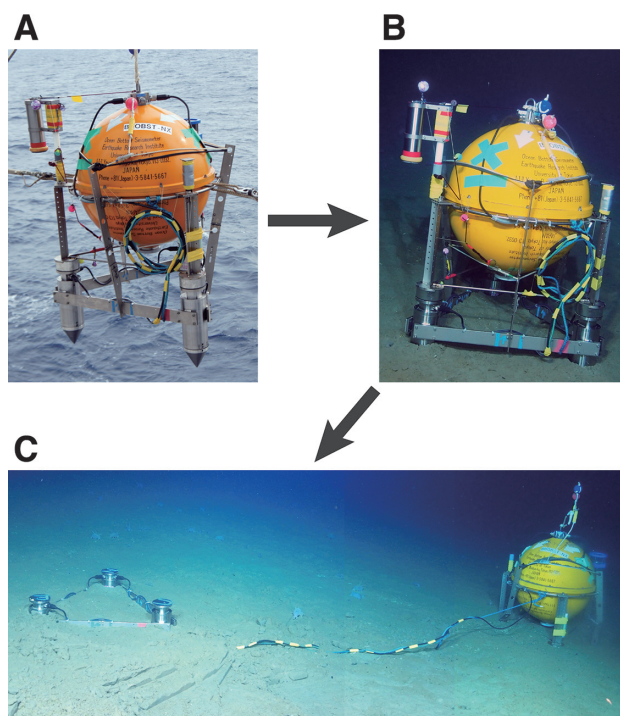


図 2. BBOBS-NX の設置時と観測中の様子

実際には 2015 年 9 月の BBOBST-NX 設置時の画像。(A) 海面からの投入前、(B) 自由落下での着底時、および (C) 無人潜水艇による展開後の観測中、である。投入時には、センサー部と記録部を一時的に固定し、展開前にそれらを解除する。機器の回収も無人潜水艇で行う。センサー部には広帯域センサーの各成分が三角形の各頂点部の耐圧容器内に、小径にするためレベリング機能無しで組み込まれている。

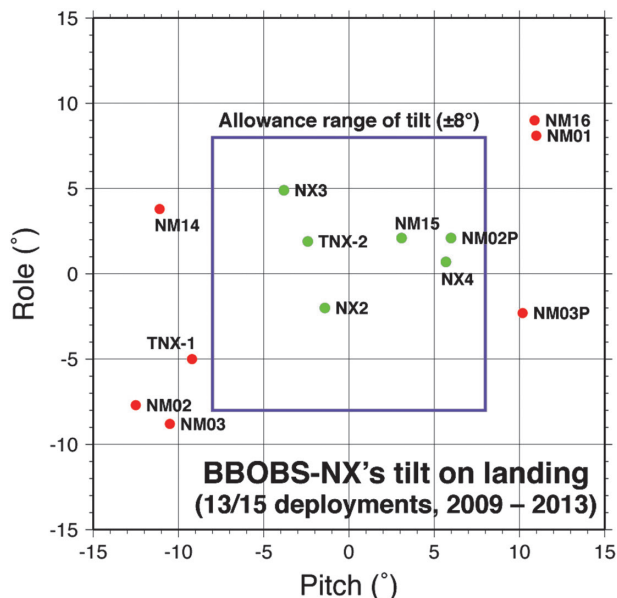


図 3. BBOBS-NX の着底時傾斜の分布

5 年間で 13 回の投入後の着底時の傾斜値を、直交 2 方向 (Pitch, Roll) で表示したもの。紫色の四角で示した範囲、水平動成分ベースの可動範囲の ± 8 度までは、使用している広帯域センサーでの許容範囲だが、約半数でこれを超えた傾斜 (赤丸) となった。

BBOBS-NX が水中を降下する際の挙動にできる限り影響を与えないで、映像と傾斜変化を記録することを目的として、単独で動作し、着底後に潜水艇での回収が可能な、DSCAM および傾斜変化を測る MEMS 加速度計ロガーを開発し、同年 9 月の BBOBS-NX（海底面傾斜測定機能を付加した BBOBS-NX；塩原ほか，2017）の設置時に、最初の計測を実現させることを計画した。

仕様検討

前述の通り、この DSCAM は BBOBS-NX が水中を降下して着底する際の挙動にできる限り影響を与えずに映像を詳細に撮ることが要求されるので、BBOBS-NX で所謂「自撮り」を、鉛直方向での流れの抵抗を受けにくい方法で行うことを想定した。BBOBS-NX からロープを介して少し上方に、透明度の高いガラス球内から直下を見るカメラを配置することも考えられるが、挙動へ影響する可能性と、BBOBS-NX のセンサー部までの距離が増すことで、漆黒の闇である深海で撮影するための照明をより強力にする必要が生じるので、難しいと判断した。既製品の水중カメラも検討したが、小型で照明機能も含む単体で動作可能なものは見つからなかった。そこで、当時一般的になりつつあった「アクションカム」と呼ばれる小型ビデオカメラを元にして独自開発することにした。その頃での有名な製品である GoPro 社の HERO4（GoPro, 2014）を最初検討したが、レンズ光軸方向での筐体の投影面積が大きく、降下時の水流の抵抗をより受けやすい耐圧容器の形状となるので望ましくないと判断した。この点を意識して他の製品を探すと、Sony の HDR-AZ1（Sony, 2014）が希望する形状であることが分かった（図 4）。現在、この後継機種はあるが高さが HDR-AZ1 での 36 mm から 47 mm と増しているため、DSCAM の仕様にそぐわなくなってしまった。

その他、この DSCAM を船上で BBOBS-NX へ装着し設置・着底するまでの手順や時間を考えると、少なくとも連続 4 時間の録画時間と 2 時間以上の録画開始までの待機時間が確保できること、録画動作の制御や撮影範囲の確認を耐圧容器外部から無線などで行えることが必要と判断し

た。この点、HDR-AZ1 では WiFi によってこれらの機能を実現できるが、金属製の筒状耐圧容器内にある HDR-AZ1 と撮影用の窓を介して無事に WiFi でタブレットなどへ接続し通信できるかは多少不安があった。また、照明機能も内蔵し、この窓から照射することになる。そして、この窓も含め、DSCAM を使用する可能性のある最大水深 6000 m での耐圧能力が必要である。

この撮影するための窓について最初は、有人潜水艇「しんかい 6500」の覗き窓（海洋研究開発機構，2016）に採用されているテーパー形状の透明樹脂製窓の方式を検討したが、ビデオカメラのレンズ、照明用 LED の配置を確保しつつ、小口径で十分な耐圧性能を得るのが困難であった。外側へ凸な半球樹脂レンズも検討したが、さほど小型化できず、画像の歪みにも問題があった。そこで、平面ガラス窓とし、高圧に耐えうるサファイアガラス窓（信光社，2015）を採用することにした。筒状耐圧容器は、扱う上で腐食の不安がなく軽量のチタン合金製とした。

製作 1

外観および内部構造断面図を図 5 に示す。当初の製作品では、耐水深を 6500 m として耐圧容器を設計し、サファイアガラス窓は 8 mm 厚で特注製造した。また、内部構成のブロック図と実際の内部の様子を図 6 に示す。

照明用 LED は超高輝度品（CREE 社製 XP-G2）と専用集光レンズを用い、その電源 ON/OFF は HDR-AZ1 本体の録画中を表示する LED 点灯を利用して動作させることにした。録画用メディアはマイクロ SDHC/SDXC カードで、128 GB 容量品を使うと、データ量の多い高画質設定でも 10 時間以上と十分な録画時間となった。これらを動作させる電源には、BBOBS で使い慣れた、軽量で高エネルギー密度な DD サイズのリチウム一次電池（開放電圧 3.9 V、容量 30 Ah）1 本を 1 回の運用で使い切るものとした。

電力消費量を推定する上では実測し、HDR-AZ1 は WiFi 機能を ON 状態での録画待機状態で 1.45 W、録画中が 1.9 W となり、そして照明用 LED はひとまず 3 W の供給、とした。ここに示す電力値は、供給源のリチウム電池からみたもので、DC-DC コンバーターなどの効率も考慮されている。その際の電池電圧は、消費電流値が大きいので 3.3 V を負荷電圧とした。その条件で、録画待機（HDR-AZ1 本体の電源を ON にし、耐圧容器を封止し、BBOBS-NX への取り付けを完了し、録画開始するまで）を 2.5 時間とすると 3.63 Wh（ \approx 1.1 Ah）消費し、4.9 W を消費する録画動作期間に使える電池容量は 28.9 Ah となり、19.5 時間は照明用 LED を点灯しての録画動作が可能と見積られる。128 GB の SDXC カードを使った場合での最高画質での最長録画時間（10 時間 40 分）は、電池の容量的に充分確保できることになった。

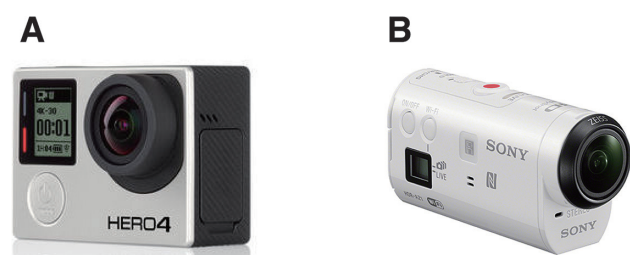


図 4. 小型ビデオカメラ「アクションカム」2 種の外観
(A) 最初に検討した HERO4, および (B) DSCAM に採用した HDR-AZ1. 後者は前面（被撮影側）から見た投影面積が小さいので、より小さな外径の耐圧容器に入れられる。

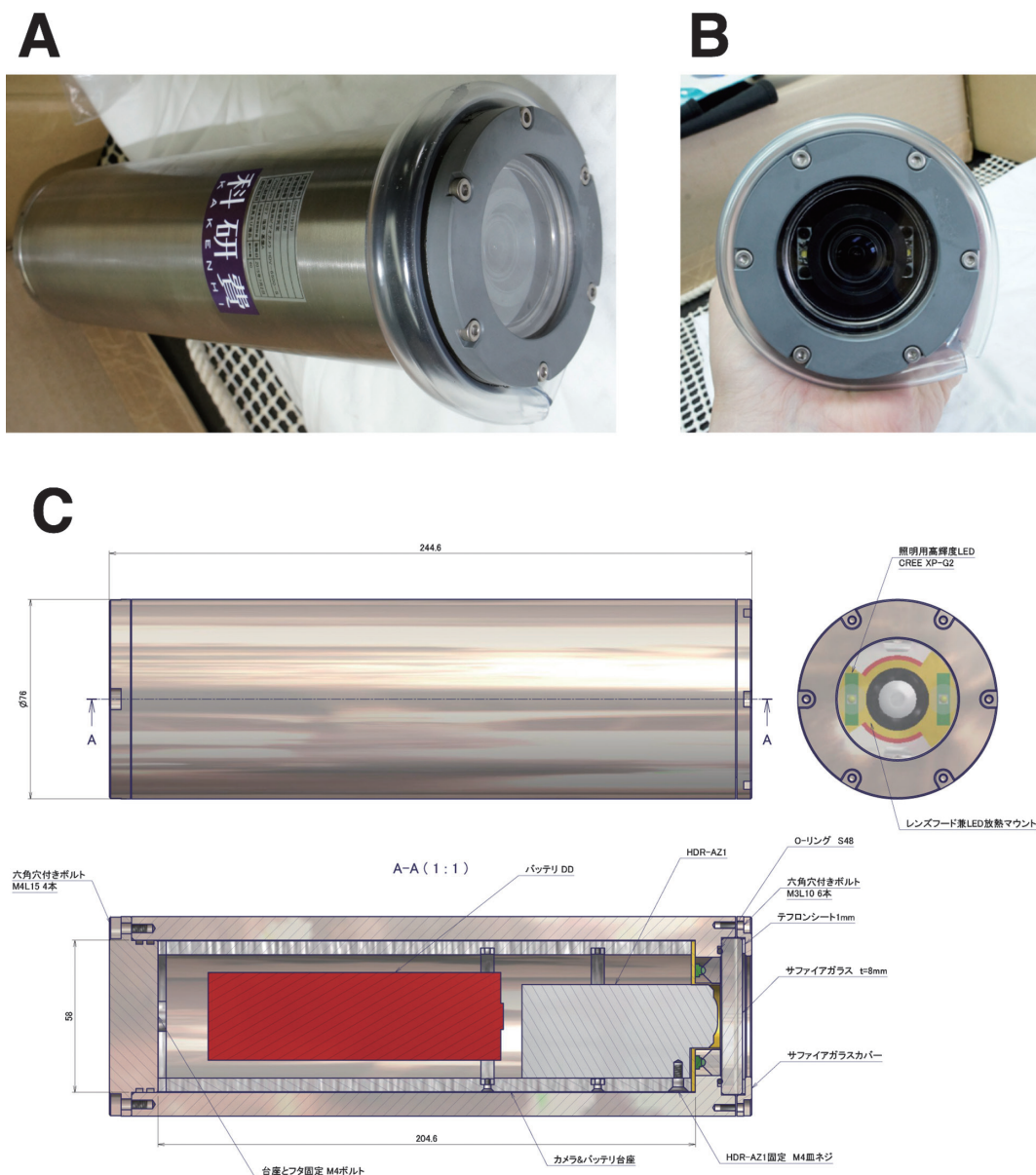


図 5. DSCAM の外観と構造図

(A) 外観で、(B) 窓側の周囲に巻いてある透明チューブは、無人潜水艇での回収作業でのガラス窓保護用。窓の中央は HDR-AZ1 のレンズで、その左右に照明用 LED が見えている。(C) 構造断面図に、サイズ（外径 76 mm、長さ 244.6 mm）と内部の配置が示されている。なお、これはサファイアガラス窓が 8 mm 厚の際の図であるが、16 mm 厚になった際の変更点はそれを押さえるカバーの厚みのみである。

この照明用 LED（3 W 供給時）での実用的照射距離も、実際に閉め切った暗い室内で映像確認を実施した。その結果、撮影距離が約 3 m では十分に HDR-AZ1 の最低必要照度（6 lux）を確保でき、着底直前の 2 秒以上は確実にその様子を録画できると判断した。

耐 圧 試 験

製作した DSCAM の耐圧試験を、海洋研究開発機構が所有する中型高压実験水槽装置（海洋研究開発機構、2015）を利用し、2015 年 7 月 3 日に実施した。前日に電

源のリチウム一次電池も含めた、動作する状態で DSCAM が納品されたことで、水槽装置内での状態を録画することにして、耐圧試験を開始した。毎分 9 気圧の加圧速度で水深 6000 m 相当の 600 気圧（60 MPa）へ上げ、30 分間保持した後に毎分 9 気圧の減圧速度で常圧へ戻した（図 7a）。試験完了前から異臭があり不審に思っていたが、装置を開封すると DSCAM のサファイアガラス窓が破損し、内部のものが潰れただけでなく、ネジで固定されていた反対側の蓋を押出ししていた（図 7c）。使用したリチウム一次電池は硫化物を含むため、異臭を発生しただけでなく、水槽

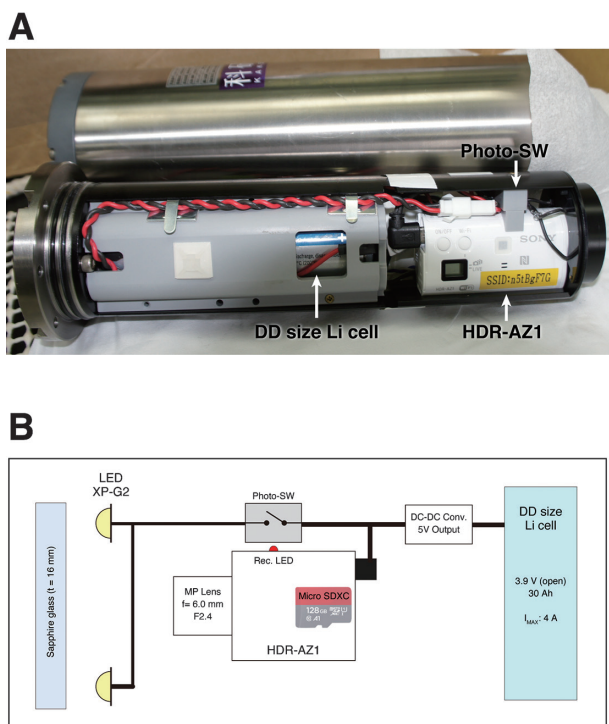


図 6. DSCAM の内部

(A) 実際の内部構造と、(B) 内部構成のブロック図を示す。HDR-AZ1 は DC5V の電源が必要であるので、DD サイズのリチウム電池 (VITZROCELL 社 SC-DD01, 他同等品) から高効率の DC-DC コンバーターを介して供給している。録画中を示す HDR-AZ1 の上面にある赤色 LED の点灯をフォトダイオードで検出 (図中の "Photo-SW") し、照明用 LED の点灯を "LED Driver" も用いて制御している。

装置を硫化物で汚してしまう結果となってしまった。高圧実験水槽装置の内部圧力記録をよく見ると、加圧中に約 503 気圧 (50.3 MPa) の位置で爆縮に伴う小さな変動が見られていた (図 7b)。後日確認すると、使用したサファイアガラス窓の条件で、サファイア単結晶での最も小さい曲げ強度値 (320 MPa: 信光社, 2015) から計算される耐圧 [51.5 MPa, 式は <http://www.shimopa.co.jp/product/data/glass.pdf> の 360 ページを参照] とほぼ一致していた。耐圧設計の時点で、製造仕様で指定したサファイア単結晶の a 面 (表 1) での曲げ強度値として、カタログに記載されていた 910 MPa を基に、耐圧計算を行ったことに問題があったと考えられる。前述の式が記載された資料では、曲げ強度の安全率を 1/10 として見積もっている点からも、十分な余裕が必要であったと考えられる。

筒状耐圧容器内側にもリチウム金属が水中で発熱反応した際の問題などがあったため、これも含めて全てを再製作することになった。構造的にはサファイアガラス窓の厚さを倍の 16mm とした点 (耐圧 206 MPa) 以外は変更していない。9 月 8 日の再試験時には、DSCAM の中身は外し、万一窓が破損しても爆縮の影響が少なくなるように塩ビ製

の詰め物をした。これは無事に耐圧試験を完了し、直ちに、最初の実海域試験を行った研究船「かいてい」へ搭載した。

製作 2 と改良

上記の通り、耐圧試験の失敗があったことで、既に DSCAM は 2 番目の製造品が初の実用機となったが、サファイアガラス窓を厚くしたことで、ある問題点が目立ってきた。できる限り、筒状耐圧容器の直径を抑えるため、ビデオカメラのレンズと照明用 LED の配置は近接している (図 5)。またこのレンズは画角が 170 度あるため、サファイアガラス窓の厚さが 8mm の際にはそれほど目立たなかった、サファイアガラス内部での照明光の多重反射 (上下面間および側面での反射) が撮影画面内に目立って入り込むようになった (図 8a)。最初の実海域試験は対策する時間が無かったので、この状態で使用したが、漆黒の深海中ではこの反射がかなり目立つため (次章参照)、その後様々な対策を実施した。

まずは、照明光が反射する各所へ、カメラ用の反射防止塗料を塗布することを実施した (表 1)。サファイアガラス窓の側面 (コバ面) での反射抑制が重要と考えられたが、これだけでは十分ではなかった (図 8b)。サファイアガラス窓と筒型耐圧容器は細い O-ring (S-48, 直径 47.5mm, 太さ 2.0mm) により水密構造を得ているが、その表面や溝からも反射光が確認された。

これを解決するため、より根本的な対策として、HDR-AZ1 のレンズ ($f = 2.8\text{mm}$, F2.8) を交換すると共に、サファイアガラス窓への反射防止 (Ion Assisted Deposition: IAD) コーティングを施すことにした。

前者に関しては、実用上 170 度の広い画角は必須では無く、より狭い画角範囲に絞れば、画像周辺部への反射光の映り込みを避けて撮影できるということである。HDR-AZ1 はレンズマウント部の雌ネジが M12 × P0.5 となっていて交換が可能であり、より焦点距離が長いものを選んだ。なお、このレンズには IR (赤外線) カットフィルターが組み込まれている。HDR-AZ1 には元々、被写界深度が深い広角レンズが付いているので、その内部にピント調節機能は無い。そこで、新たな長焦点の (被写界深度がより浅い) レンズ ($f = 6.00\text{mm}$, F2.4, 画角 66 度) では、マウント部への取り付け位置を調整し、カメラから 3 m 前後の距離で鮮明な画像が撮れるように設定した。その際、レンズとマウントの固定には、ロックリングを組み込める空間がないこと、調整後に余計な外力でレンズの位置がずれる心配の無いことから、紫外線硬化樹脂を使用した。

次に、サファイアガラス窓の表面 (内側と外側) へ IAD コーティングを施した。但し、これは製造直後のガラスに対してしか施工してもらえないため、新たなサファイアガラス窓を製造する必要があった。なお、深海での海

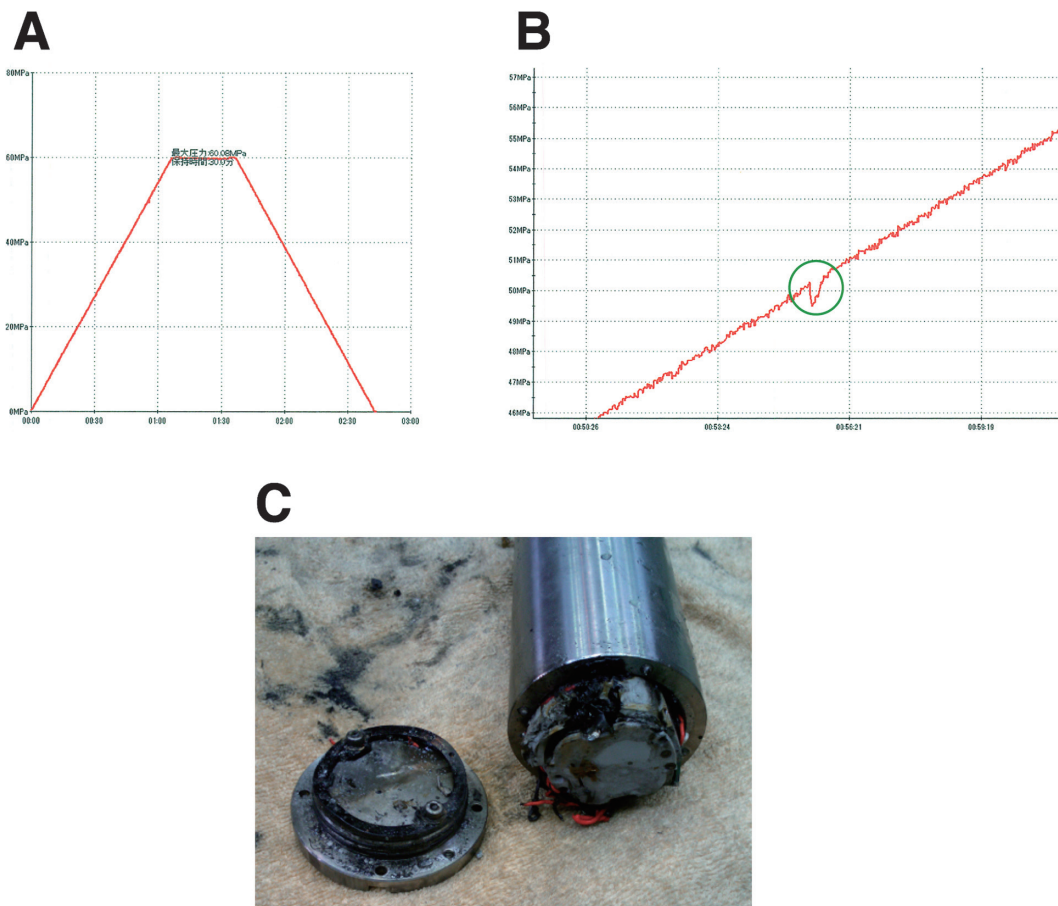


図 7. 最初の耐圧試験

試験装置内の圧力記録で (A) 全試験時間および (B) 窓の破損 (爆縮) が発生した時点のもの。最大圧力は 60 MPa で 30 分間維持した。破損が発生した部分を (B) に緑色の円で示した。約 50.3 MPa に達したところで爆縮が起き、耐圧容器内へ落ち込んだ分の圧力低下が見られる。(C) 破損した DSCAM は、8 本のボルト止めた蓋が内側から押されて外れていた。容器内部に在ったものは電池もカメラも完全に潰れており、耐圧容器から取り出すことも困難であった。

表 1. 製作したサファイアガラス窓の仕様

共通した仕様として、両面研磨、平行度・平坦度指定無し、面方位: a 面 $\leq \pm 2^\circ$ 、を指定した。コバ面の黒塗り加工ではキヤノン化成社製 GT7(Ⅱ)を使用。

反射防止 (IAD) コートの詳細仕様は、入射角 $\theta = 0^\circ$ 、波長範囲 $\lambda = 400\text{--}700\text{ nm}$ 、対空気: $R\lambda \leq 0.5\%$ 平均 (目標値)、対海水: $R\lambda \leq 0.2\%$ 平均 (目標値)、となっている。ここで $R\lambda$ はその波長域での反射率を示す。空気-サファイア-海水の透過率 (計算値) は、IAD コート処理前で 90.8 %, 処理後で 99.3 % となった。

| 製作 番号 | 厚さ (mm) | 直径 (mm) | コバ黒 塗り加工 | 反 射 防 止 コート | 備 考 |
|----------|------------|------------|-------------|----------------|----------|
| 1 | 8 | 59.5 | 無 | 無 | 耐圧試験で破損 |
| 2 | 16 | 59.5 | 有 | 無 | 2015 年製造 |
| 3 | 16 | 59.5 | 有 | 有 | 2017 年製造 |

水に接する外側のコーティングの経年劣化は判断するための実績が無く、どの程度の耐久性があるか施工業者に疑問視されたが、次章にあるとおり、実際に使用してもコーティングの剥がれなどの支障は発生しなかった。IAD コーティ

ングの効果は、室内試験結果 (図 8c, d) から明確に分かる。これが無い図 8c では照明用 LED (5 W 供給) の反射光が画像上下にはっきりと見えるが、コーティングが有る図 8d ではこの反射が消え、全体が鮮明な映像となっている。この際、照度計を用い、空気-サファイア-空気での結果となるが、距離 3 m で 6.7 % の照度 (透過率) の向上が確認された。これらは 2016 年 10 月の NX-2G 動作試験での運用前までに実施し、その結果、照明光の撮影画面への映り込みは概ね支障が感じられない程度になった (次章参照)。

実海域試験での適用と結果

表 2 に示すように、これまで 3 回、実海域試験で運用し、これまで見る事が出来なかった映像を無事に得ることができた。特に、当初の最重要な目的であった、BBOBS-NX の着底時傾斜については、2015 年 9 月に BBOBST-NX を設置する際に、MEMS 加速度計ロガーと同期した記録を得た。図 9a, b には DSCAM が BBOBST-NX にど

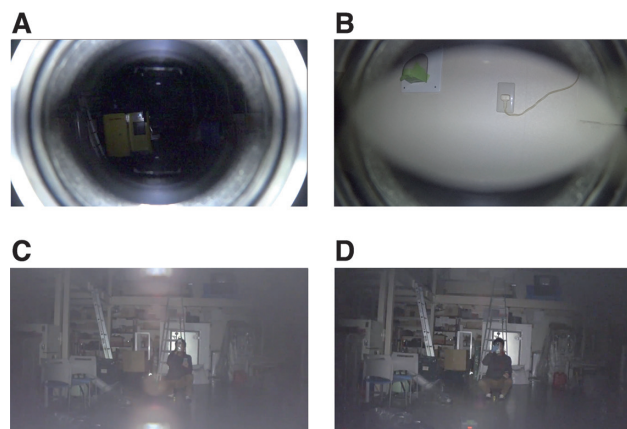


図 8. 光学系の陸上試験

(A) 16mm 厚のサファイアガラス窓に変えた時点での LED 反射光の写り込み、(B) 同じ厚みのアクリル窓のコバ面へ反射防止剤を塗布した結果。これらは共に筒の中から覗いているように見えるが、画像周囲の円上の明るい部分は反射光である。細く黒いのは O-ring の部分からの反射。コバ面だけの対策では不十分と見える。より根本的対策として、長焦点のレンズへ交換すると共に、サファイアガラス窓への反射防止 (IAD) フィルター施工の無し (C) と有り (D) で、映像の差を確認した。

表 2. これまでの実海域試験での DSCAM 運用

過去 3 回の、BBOBST-NX および NX-2G の実海域試験観測で DSCAM を使用した際の情報。観測対象となった機器をそれぞれ T-NX と 2G と示した。画質設定の PS, SSLOW, HS120 は、最高解像度 (2 倍なめらか映像)、スーパースロー撮影 (4 倍スローモーション映像)、ハイスピード撮影 (4 倍なめらか映像)、をそれぞれ示す。

| 実施年月 | 水深 (m) | 試験 本体 | 画質 設定 | SD 容量 (GB) | 備考 |
|---------|-----------|----------|----------|---------------|----------|
| 2015/09 | 5430 | T-NX | PS | 32 | 着底時傾斜確認 |
| 2016/10 | 1570 | 2G | SSLOW | 128 | 傾斜抑制試験 |
| 2017/04 | 4240 | 2G | HS120 | 128 | 1 年半後に回収 |

のように取り付けられているか、および撮影範囲を iPad 上の専用アプリにより WiFi 経由で確認している様子を示した。この後、BBOBST-NX を投入のために船尾へ移動開始する際に、このアプリから録画開始させた。録画動作はアプリでの表示と共に、照明用 LED の点灯によっても確認できる。また、海面からの投入直後と着底時の DSCAM による撮影画像もスナップショットとして載せている (図 9c, d)。これらの結果、BBOBST-NX は海面からの投入直後から降下中は ± 15 度近くにもなる傾斜変動を約 3 秒周期で起こしており、着底直前の傾斜状態を保存した形で、センサー部が海底堆積層へ貫入していることが分かった (図 9e)。映像記録上での問題としては、比較的低光量下で移動体から撮影したので、やや不明瞭な映像となってしまった (図 9d)。すなわち、標準の画質設定ではなく、高精細で時間密度の高い記録画質を設定し、かつ、より照射光を強くして撮影することが必要となった。その

ため、照明用 LED への供給電力を 5W まで上げることにした。この場合でも録画時間として 13.8 時間は確保できる。これ以上大きな電力を与えるのは、使用している LED での放熱の問題、電池への負担が増えることでの録画時間の減少もあり、この程度が妥協点となった。この時点で、前章で述べたレンズ交換と IAD コーティングの改修を行った。

2 回目の運用 (2016 年 10 月) では上記した、降下中の大きな傾斜変動を抑制することが期待される構造を採用した NX-2G の動作試験において、その効果を確認するために用いた。但し、この撮影時は画質設定を SSLOW とした (表 2) のだが、連続撮影可能時間が約 3 時間という制約があるのを見落としてしまった。結果的には無事に着底状態までを撮影できたが、注意すべき点であった。他の画質設定では、記録メディア容量や電源の制約がなければ、10 時間以上の連続撮影が可能であった。なお、より肝心な成果としては、傾斜変動を抑制する構造が非常に効果的であったことが確認された (Shiobara *et al.*, 2019)。

以上の 2 回は、撮影対象機器である BBOBST-NX・NX-2G を設置した際に、無人潜水艇で DSCAM を投入の翌日までには回収したが、3 回目 (2017 年 4 月) では無人潜水艇が使えず、NX-2G が設置時に行う自律動作を観察するために用いた。よって、設置から約 1 年半後の NX-2G 本体の回収時に DSCAM も無人潜水艇により回収された。水深 4200m の深海で長期間にわたり置かれていたが、IAD コーティングも含めて一切問題点はなく、期待していた映像を水中音、NX-2G 側からの送信音と自律動作機構部の動作音、も合わせて得ることに成功した (図 10)。NX-2G の投入・自由落下・着底後に海上の研究船から音響信号で観測開始の指示を与えることで、自律的な起動動作が完了したことを録画した後は、数時間にわたって、NX-2G 記録部の揺れや低層流の様子 (浮遊物の移動による方向・速さ) が記録されていた。

ま と め

主たる開発研究 (NX-2G) のために、今回 DSCAM を独自開発・運用し、その役割を十分に果たすことができた。自由落下で設置される観測機材が水深数 1000m の深海底においてどのように着底するかは、おそらく史上初めて映像で捉えられたもので、NX-2G の自律動作を映像でも確認出来たことは予想外の成果であった。一方、初回の耐压試験での失敗は大きな教訓であった。なお、2017 年のある研究船航海では海底の岩石を採取するドレッジ作業において、同様な単体で動作する深海用ビデオカメラを開発、使用していた (坂本ほか, 2017)。ドレッジ作業は、これまでワイヤーの張力値を頼りに、見えない深海底を探るような作業であったので、どのように岩石が採取されるのか

を知りたかったのである。著者の研究分野での過去を振り返ると、かつては海底地震計の海底での設置状態を見ることが出来ないままに機器開発を進めるしか無かったが、有人／無人潜水艇により実際に視る機会を複数回得たことで、観測状態への理解が大幅に深まった。このように、深

海底での映像を撮ることで、海域での各種の研究で進展が今後期待できるものと考えている。なお、本 DSCAM など得られた観測時の動画は、YouTube 上の NOM チャンネル（「BBOBS-NX」もキーワードとしての検索を推奨）にて公開してある。

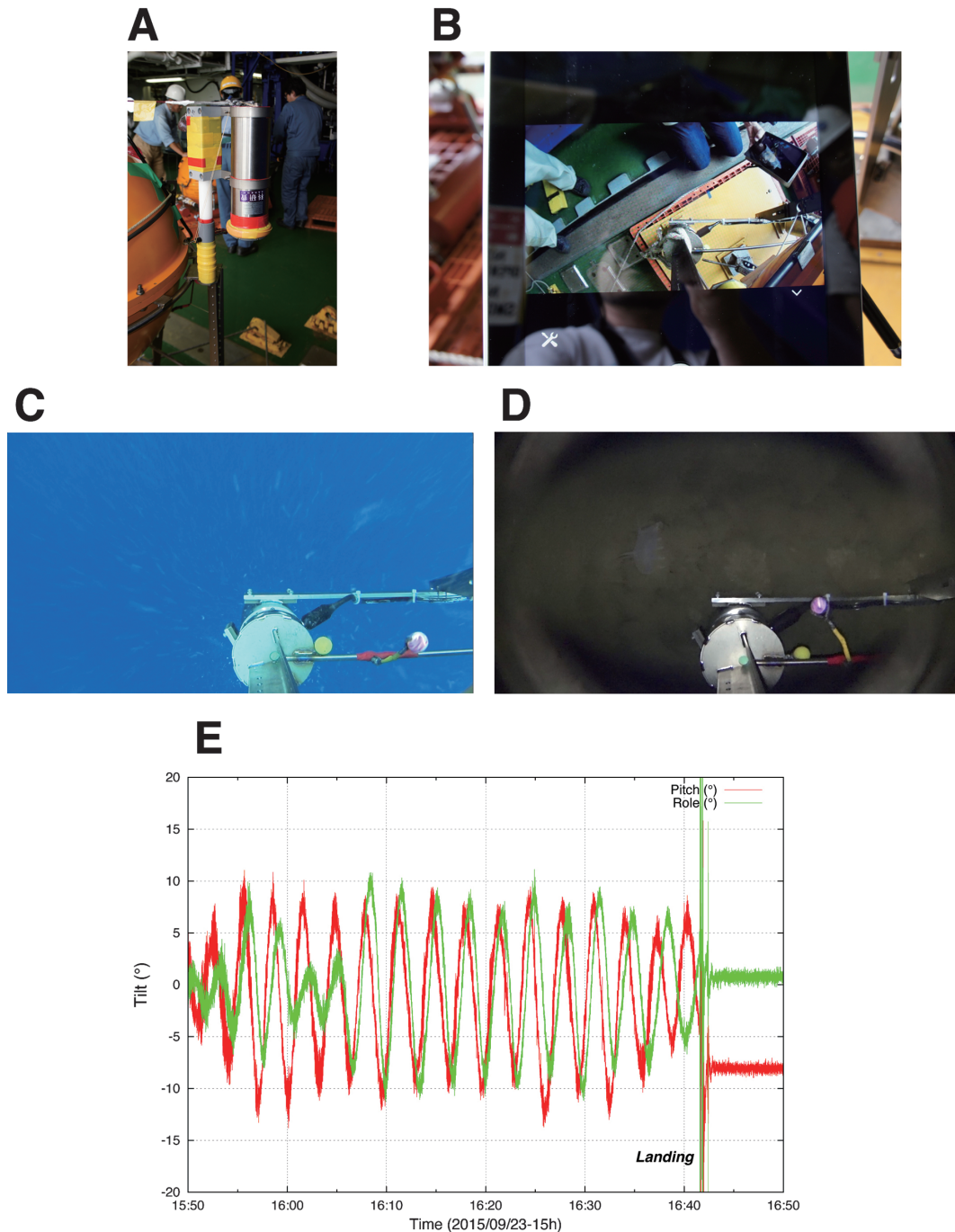


図 9. 最初の DSCAM 運用

2015 年 9 月の BBOBST-NX 設置時（図 2）。(A) DSCAM の取り付け状態であるが、無人潜水艇で持ち帰ることが可能のように取り付け方を細工してある。(B) iPad で映像をモニターしている様子で、映像中にもこの iPad が右上に映っている。(C) 投入直後の降下中、および (D) 水深 5400m への着底開始時の画像。図 8a と同様に (D) には周辺部へ照明反射光が映り込んでいる。(E) 別途取り付けしていた、MEMS 加速度計ロガーで得た傾斜変動記録で、着底前後の 1 分間を示す。大きな周期的傾斜変動は、投入直後から着底まで継続していた。

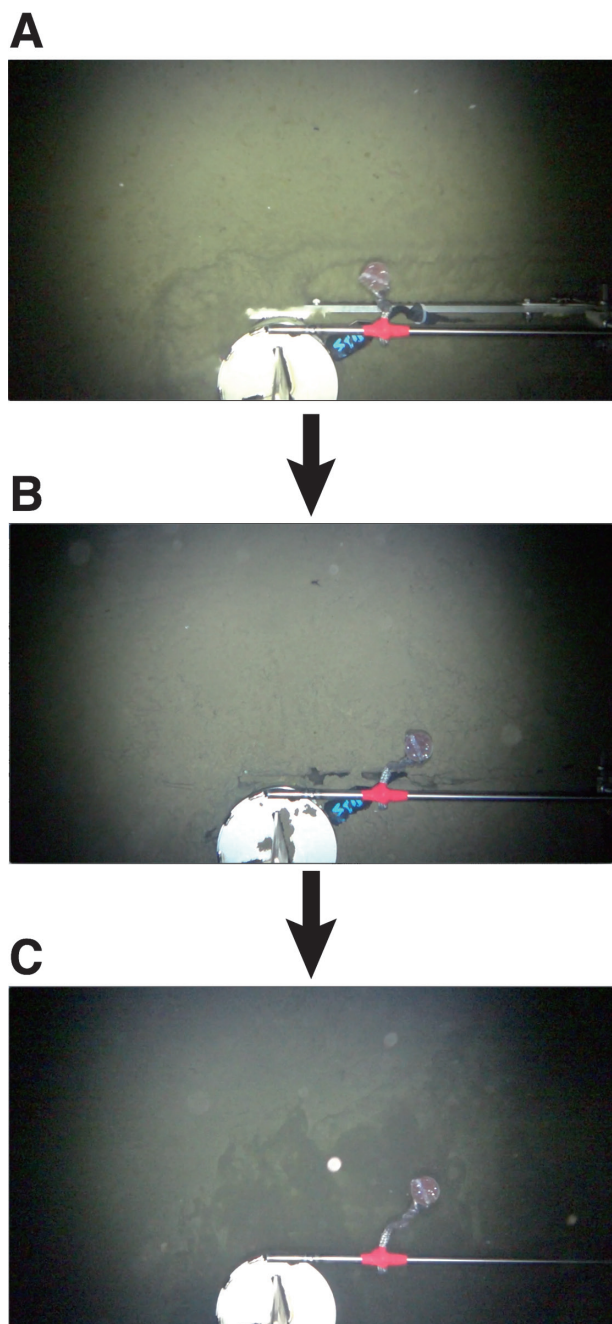


図 10. NX-2G での設置時の「自撮り」映像

(A) 着底開始時、海面の研究船からの音響命令により自律動作で起動する前 (B) と後 (C) の DSCAM による映像を示す。(B) では DSCAM が取り付けられている記録部がセンサー部と接しているが、(C) になると記録部は 40 cm 程上方へ離れている。センサー部の水中コネクタ (黒地に水色文字) やセンサー部の頂点間をつなぐ横板が見えなくなっていることに注意。

謝 辞：本研究での観測は、海洋研究開発機構の研究船「かいれい」・ROV「かいこう 7000 II /Mk-IV」による KR15-15・KR17-06・KR18-13 航海および海洋エンジニア

リングの第一開洋丸・KAIYO3000 で実施され、それぞれの船長・船員・潜航チームならびに日本海洋事業の支援員などに大変お世話になったことを感謝します。技術職員の田中伸一博士、海洋研究開発機構の伊藤亜妃博士、東北大学の日野亮太博士・他には、上記観測航海において多くの支援を受けたことを感謝します。また、海洋研究開発機構の中型高圧実験水槽装置を運用担当の皆様には、多大なご迷惑をかけたにも関わらず快く再度の耐圧試験を実施させて頂き、大変ありがたく思っています。

査読者 2 名、および技術研究報告編集委員会には、原稿の改善に有益なご指摘を頂きました。ここに記して感謝申し上げます。また、本研究は JSPS 科学研究費基盤研究 (A) JP15H02122 の一部として補助を受けて実施しました。

文 献

- Collins J. A., F. L. Vernon, J. A. Orcutt, R. A. Stephen, K. R. Peal, F. B. Wooding, F. N. Spiess and J. A. Hildebrand, 2001, Broadband seismology in the oceans: lessons from the Ocean Seismic Network Pilot Experiment, *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 49-52.
- GoPro, HERO4, 2014, <https://www.tajima-motor.com/gopro/product/specifications/index.html>, (参照 2020-05-28).
- 海洋研究開発機構, 中型高圧実験水槽装置, 2015, http://www.jamstec.go.jp/j/about/equipment/yokosuka/chugata_kouatsu_jikken.html, (参照 2020-05-28).
- 海洋研究開発機構, 有人潜水調査船しんかい 6500, 2016, <http://www.jamstec.go.jp/shinkai6500/system/>, (参照 2020-06-08).
- 坂本 泉・飯島さつき・門馬大和・谷健一郎, 2017, カメラ付きドレッジ「さつき」システム その開発と機能紹介, ブルーアース 2017, 日本大学, 3 月 2 日, BE17-12.
- 信光社, 高温 / 高圧窓材 2015, <https://www.shinkosha.com/scube/use.html#u07>, (参照 2020-05-28).
- Shiobara, H., T. Kanazawa and T. Isse, 2013, New Step for Broadband Seismic Observation on the Sea Floor: BBOBS-NX, *IEEE-JOE*, **38**, 2, 396-405.
- 塩原 肇・杉岡裕子・太田豊宣・大西信人, 2016, 次期高機能海底地震計開発試験に向けた深海用小型ビデオカメラの開発, ブルーアース 2016, 東京海洋大学, 3 月 9 日, BE16-59.
- 塩原 肇・篠原雅尚・伊藤亜妃・日野亮太・佐藤利典・杉岡裕子, 2017, 海底面での機動的傾斜観測実現に向けた BBOBS-NX での長期試験観測, 日本地震学会秋季大会, 鹿児島, 10 月 26 日, S02-07.
- Shiobara, H., A. Ito, H. Sugioka and M. Shinohara, 2019, New Era of Ocean Bottom Broadband Seismology with Penetrator System of the Autonomous BBOBS-NX (NX-2G), IUGG2019, July 16, S05 a, IUGG19-0453.
- Sony, デジタル HD ビデオカメラレコーダー アクションカム ミニ HDR-AZ1, 2014, <https://www.sony.jp/actioncam/products/HDR-AZ1/>, (参照 2020-05-28).
- Suetsugu, D. and H. Shiobara, 2014, Broadband ocean bottom seismology, *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, **42**, 27-43, doi:10.1146/annurev-earth-060313-054.
- 末次大輔・塩原 肇, 2020, 日本の広帯域海底地震学, 地震 **2**, 73, 37-63, doi:10.4294/zisin.2019-6.