東京大学地震研究所技術研究報告，No. 27，14-19 頁，2021 年.
Technical Research Report, Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, No. 27, pp. 14-19, 2021.

報　告

―高機能海底地震計開発試験に向けた―
深海用加速度データロガーの開発

塩原　肇*†・太田豊宣**

Development of a Deepsea Acceleration Data Logger for Testing the New Autonomous Ocean Bottom Seismometer Development

Hajime SHIOBARA*† and Toyonobu OTA**

は　じ　め　に

本報告では，技術研究報告 26 号に掲載された論説「深海用小型ビデオカメラの開発」(塩原ほか，2020) に引き続き，同じ機器開発（NX-2G）のために「深海用ビデオカメラ」と並行して開発した独自の測定機器について，その開発経過と運用結果を紹介する．よって，NX-2G の開発目的については上記論説を参照して頂きたい．

開発目的と基本仕様

広帯域地震センサー部を海底面に重力で貫入させる仕組みの BBOBS-NX（Shiobara *et al.*, 2013）を実際に複数回運用した中で，想定以上に着底時の傾斜が発生していたことから，その発生原因を確認する必要があった．映像で観るためには「深海用小型ビデオカメラ（DSCAM）」(塩原ほか，2020）を開発したが，定量的に降下中の BBOBS-NX の状況を把握するため，その挙動に対して影響を極力与えずに，姿勢変化を記録する手段が必要であった．この BBOBS-NX は潜水艇を利用するオフライン観測システムであり，これ自体を海底から回収して観測データを得る方式である．よって，BBOBS-NX 記録部の耐圧容器内にそれを入れてしまうと，観測終了後（通常 1 年以上）まで記録が見られなくなってしまうので，潜水艇による BBOBS-NX 設置時の展開作業中に，DSCAM と併せて回収することが望まれた．

このような目的で使用するセンサーとしては，近年スマートフォンなどに組み込まれている MEMS（Micro Electro Mechanical Systems）の加速度センサーを使用するのが妥当と考えられた．すなわち，重力加速度が直交 3 成分の各加速度値に対してどのように配分されるかで，この記録システム（と取り付けた BBOBS-NX）の座標軸がどのように傾斜しているかが分かる．この値を連続的に得ながら，時刻情報を加えて何らかのメディアに記録しておけば良いことになる．これの開発に先行して，Paroscientific 社製のシリアルデータ出力の Intelligent Depth Sensor（8CB7000-I）(2008) 水圧計のデータロガー（図 1）を 2012 年に開発・運用を開始していた（塩原ほか, 2014）．よって，取得したデータを SD カードへ記録する機器は既に出来ており，その構成を元に，再設計する方針をとった．また，BBOBS-NX の外装へ無理なく取り付け，かつ降下時の水流への影響が少なくなるような大きさ，そして BBOBS-NX の最大設置

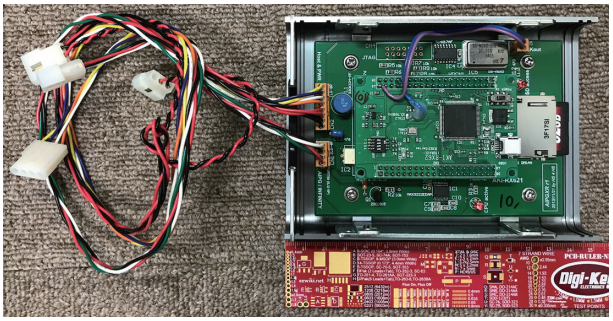


図 1.　水圧計データロガーの外観．2012 年に開発した，インテリジェント水圧計のシリアルデータ出力にタイムスタンプを付けて SD カードに記録するデータロガー．MPU 内蔵の RTC への基準周波数を高精度の TCXO（PCB の右上）から供給することで安定化させ，長期観測に適するようにしてある．水圧計に DC 6 V を供給する必要があることで電源用電池を 2 直列のリチウム電池にしてあるため，PCB 上に 3.3 V 出力のスイッチング電源回路を載せて電源利用効率を良くしてある．

2021 年 9 月 20 日受付，2021 年 12 月 8 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
** 有限会社テラテクニカ
* Ocean Hemisphere Research Center, Earthquake Research Institute, The University of Tokyo.
** TIERRA TECNICA Ltd.

水深 6000 m まで使える耐圧容器の外寸を，収納する回路基板のサイズも考慮して検討する必要があった．制御用の MPU（Micro Processing Unit）ボードは 2012 年から上記のデータロガーなどで使用開始し，内蔵周辺回路用の独自ライブラリプログラムも整備してあったルネサス製の MPU を搭載したもの（RX621 マイコンボード，2011）を利用するものとした．

設計と製作

この加速度データロガー（DSALOG）での基本動作は以下の様になる．使用する MEMS 加速度センサーを，個々に設定したデータレートでフリーランさせ，それぞれのセンサー内部の FIFO（First In First Out）バッファにデータが溜まった時点で MPU にハードウェア割込みをかけ，各センサーのデータを逐次 MPU が取り出す，というものである（図 2）．これは MPU 内 CPU の負荷を減らし，記録動作中は SD カードへの書き込み作業に集中させるためである．SD カードと MPU 間では，SD カードへ FAT ファイルシステムで書き込むため FatFs 汎用 FAT ファイルシステム・モジュール（2009）を使用しており，その付属ドライバプログラムで SPI（Serial Peripheral Interface）による通信方式を既に使っていた．そこで，このプログラムを流用・修正し，加速度センサーと MPU 間での通信も SPI で行うことにした．使用した MPU には複数の SPI ポートがあるので，SD カード用と加速度センサー用は通信の競合を避けるため，個別のポートに割り当てている．加速度センサーのデータを受け取るバッファエリアは 2 つ設定し，データを逐次受け取る側と SD カードへ書き出す側を交互に切り替える方式を採り，バッファへのアクセスを分離させた．最終的に使用した 3 軸加速度センサーモジュール ADXL345（2013）の場合，30 個のデータ（6 byte 長）がセンサー内の FIFO に溜まったら MPU への割込みを発生し，MPU が 180 byte のデータ転送を SPI で行い，MPU 内蔵 RTC（Real Time Clock）の時刻をタイムスタンプとしてデータと共にバッファ内に記録する．48 回の割込みでのデータがバッファ内に溜まった時点でバッファを切り替えている．使用した MPU で高速に書き換え可能な RAM エリアは 96 Kbyte であり，SD カードへの 1 回の書き込み動作でのデータ転送量（時間），およびプログラム内で使用する変数領域などの確保などを考慮して，上記のバッファサイズを設定した．なお，SD カードへのファイル書き込み（1 日 1 ファイル）は毎回クローズ処理し，出来るだけデータファイルが保全されるようにしている．

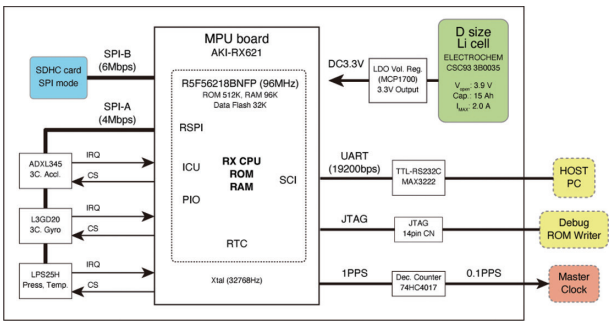
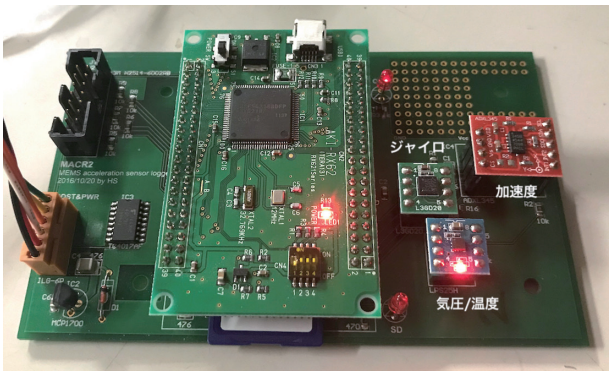


図 2.　DSALOG の構成図．本加速度データロガーのブロックダイアグラムである．3 種の MEMS センサーは 1 つの SPI ポートでバス状に接続されて，MPU 側からアクセスする際には CS 信号で選択され，それぞれの FIFO にデータが溜まったら各センサーの割込み信号（IRQ）を MPU が受け付ける．SD カードには別の SPI ポートを割り当てている．日時は MPU ボードに載っている水晶振動子（Xtal）で動作する MPU 内蔵の RTC で管理している．時刻を正確に測る際には，10 秒信号（0.1 PPS）を用いる．各種の設定などは，非同期シリアルポート（UART［RS232C］）で PC から行う．

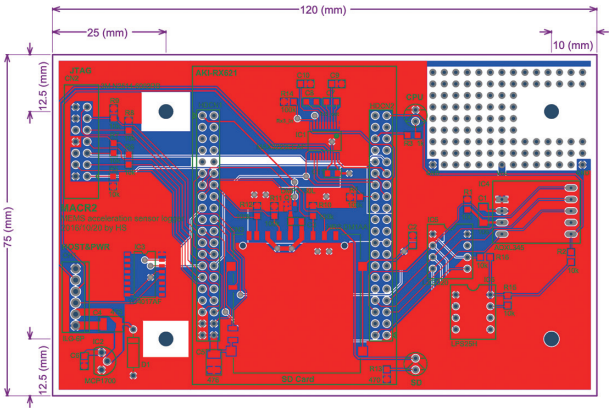
最初の試作時には，3 軸加速度センサーモジュール LIS3DH（2013）を使用したが，「運用結果」で後述するように実際の使用時に障害があったので，より高精度記録が期待出来る 3 軸加速度センサーモジュール ADXL345（2013）へ変更すると共に，3 軸角速度センサー（ST マイクロ L3GD20 使用 3 軸ジャイロセンサーモジュール，2015）と気圧・温度センサー（LPS25H 使用気圧センサーモジュール DIP 化キット，2015）を追加し，加速度センサーと同様な手順で記録するように変更した．図 3 に，2016 年に再設計した DSALOG の PCB（プリント回路基板）を示すが，それまでは加速度センサー以外の 2 つのセンサーモジュールへは手配線してあった．MPU ボードと各センサーモジュールは電源電圧 3.3 V のみで動作しており，待機時は 7 mA，記録動作中は 33 mA の平均消費電流（DC3.8 V 供給時）である．

この DSALOG を動作させたい時間の見積もりとしては，耐圧容器を閉める前に記録開始させて，これを BBOBS-NX へ取り付け，海面から自由落下して着底するまでとなるので，最低限で 24 時間程度と想定した．よって，使用する SD カードの容量として数 100 Mbyte 以上あればよく，電源用の電池はリチウム一次電池（D サイズ，開放電圧 3.9 V，容量 15 Ah）1 個で充分に使用出来るものとなった．実際には，加速度センサーを 400 Hz のデータレートで動かし，数 Gbyte の SD カードを使い，数日間までの連続計測を行っている．記録動作を停止させるには，事前に記録終了日時を設定した RTC のアラーム割込み発生，または PC からのシリアル通信で，停止させる文字列の入力（“exit” 又は “quit”）により行えるようにした．

なお，回路設計と PCB データ作成には Altium Designer（2006）を使用し，PCB の製造と部品の実装はオンラインで発注できる P 板.com（2002）を利用した．MPU の動作プログラム（ファームウェア）は，やや旧式の開発環境であるがルネサス製の HEW（2012）を用いて C 言語により記述し，E1 エミュレータ（2012）で Windows PC と PCB



（A）

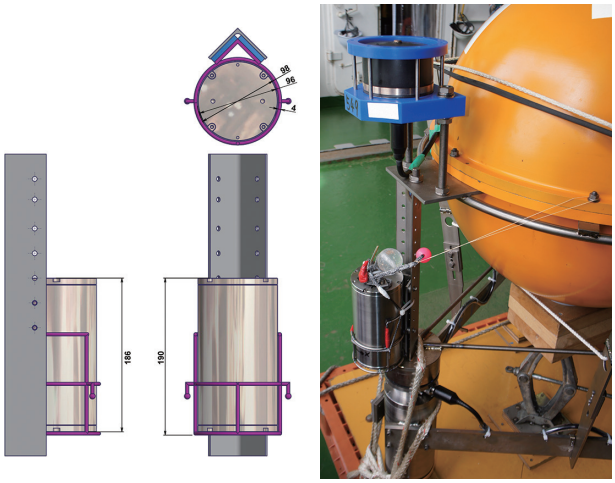


（B）

図 3.　DSALOGのPCB.（A）2016年に修正した後のPCBで，記録動作させている状態である．中央部のMPUボード（AKI-RX62）下にSDカードの一部が見える．右側に3つのMEMSセンサーモジュールがあり，各PCBの色は，赤が加速度，緑がジャイロ，青が気圧/温度のセンサー，となっている．電源部（左端手前）は3.3 V出力のシリーズレギュレーターと簡略化してある．（B）このPCB製造時のデータで表面から見た図面で，赤が表面，青が裏面の回路パターンを示すが，後者はほぼ隠れている．寸法は120 mm×75 mm.

上に設けたJTAGコネクタ間を接続しデバッグを行った．最終的なファームウェアはJTAGコネクタ経由でMPU内のROM（フラッシュメモリー）に書き込んでいる．

一方，耐圧容器については，要求される仕様に沿っての設計と製造をテラテクニカ社に依頼した．取り付け箇所としては，BBOBS-NX記録部の音響トランスデューサー下方が，海中を降下している機器本体の姿勢に対して，データロガーを取り付けた影響を最も与え難そうであるので，そこへ収まる様に外寸上限を設定した．また，着底後の無人潜水艇による分離・展開作業時にこのDSALOGの固定を解除して回収するので，潜水艇のマニピュレータで問題無く扱えることも考慮し，取付位置を決めた（図4）．また，PCBの設計時に検討した結果，MPUボードの長辺を，PCBの短辺方向に対応する耐圧容器の径方向に設定してPCBの寸法を決定，その条件も含めて，出来るだけコンパクトになるように，耐圧容器の寸法を決定した．耐圧容器



（A）　　（B）

図 4.　KR15-15航海時のBBOBST-NXへ取り付けたDSALOG.（A）耐圧容器の取り付け方を検討した際の図面，および（B）実際にBBOBST-NXへ固定した際のDSALOGで，無人潜水艇で取り外せる仕組みとしてある．上方にある青い台座とガードに囲まれている黒いものが音響トランスデューサーである．

および耐圧設計時のシミュレーション結果を図5に示す．

運　用　結　果

最初の実地でのDSALOGの使用は，2015年7月に海洋研究開発機構の「なつしま・ハイパードルフィン」NT15-12航海での房総半島南東沖での地震・傾斜変動同時観測用のBBOBST-NXを投入した際（Shiobara *et al.*, 2021）であったが，回収した記録を見ると，投入前に甲板上で移動している際に加速度センサーが動かなくなり，潜水艇での回収後，船上に戻った時点で復帰していた．そこで，次の使用機会までに搭載する加速度センサーを切り替えた．よって，最初に実際の測定記録を得たのは，DSCAMを初めて使用した，2015年9月の「かいれい・かいこう7000II」KR15-15航海で宮城沖の日本海溝陸側斜面へBBOBST-NXを設置した際となった．この時に得られた，BBOBST-NXが海中を降下し，着底前後約1分間での傾斜変動を図6に示す．数秒周期で±10度を超える傾斜変動を降下中は継続して起こしており，着底直前の傾斜値が着底時の傾斜として残っている様であった．なお，角速度センサーのデータから傾斜に変換した結果でも同様な傾斜変動となった．

この大きな傾斜変動を抑制する方法を，自律動作方式のBBOBS-NXであるNX-2G試験機の実地機能試験（Shiobara *et al.*, 2019）で試した際には，その記録部（チタン球耐圧容器）内にDSALOGのPCBを固定して傾斜変動を計測した．試した方法により，降下中の傾斜変動が効果的に抑制されていることが明白に分かった．特に，海面からの降下開始時に傾斜変動が変化する様子から，想定した効果が期待通りであったことが確認された（図7）．傾斜変動を抑制す

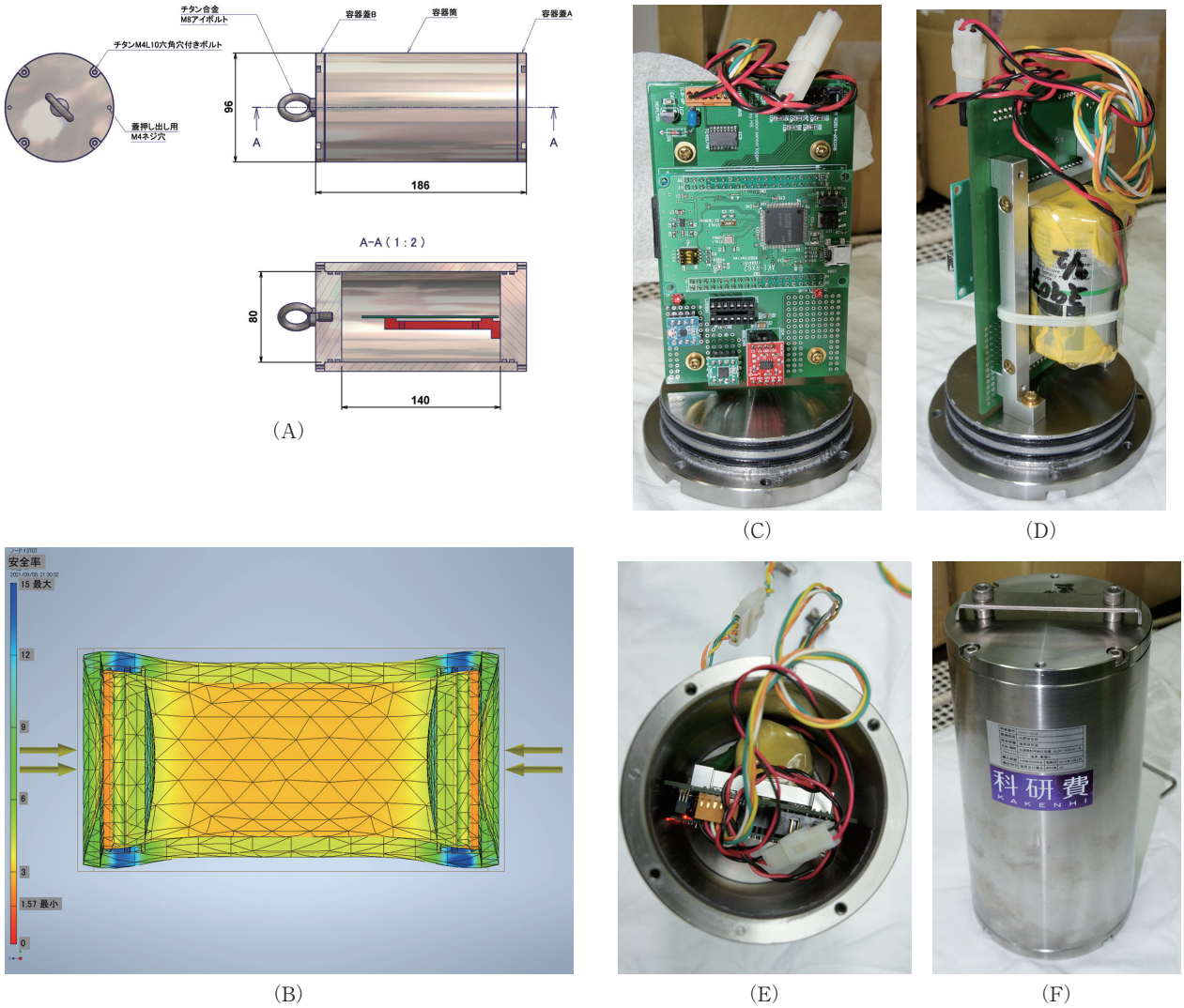


図 5.　耐圧容器の図面と耐圧計算結果，組み込んだ状態．（A）耐圧容器の図面，最終的な構造（上蓋の取っ手部分）は異なるが基本部分は変わっていない．（B）耐圧計算の結果で，水深 6500 m 相当の静水圧下で，最小でも 1.57 倍の安全率が確保されている．（C）PCB を下蓋上に固定した様子で，追加した 2 つの MEMS センサーモジュールは手配線してある．（D）電源のリチウム電池 1 個は PCB の背面に固定．（E）耐圧容器の筒を被せた状態の内部で，動作設定し，記録開始させたら上蓋を閉める．（F）BBOBST-NX へ載せる前の状態，取っ手部分に回収用ロープなどをこの後で取り付ける．

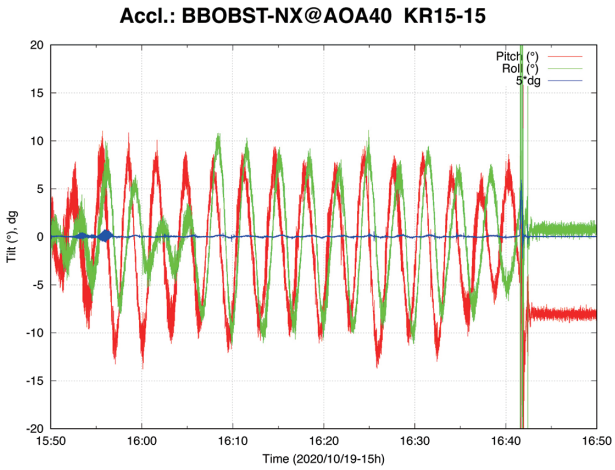
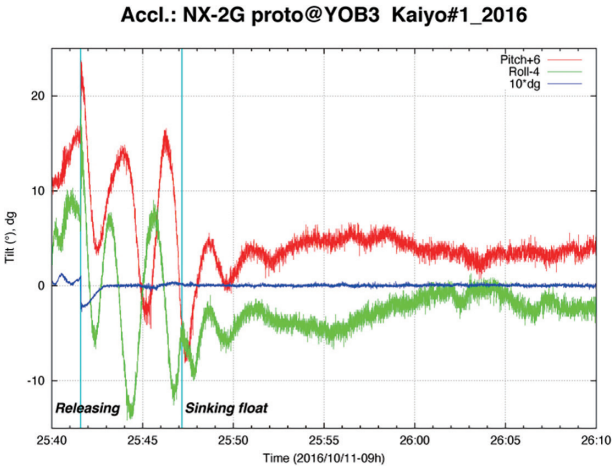
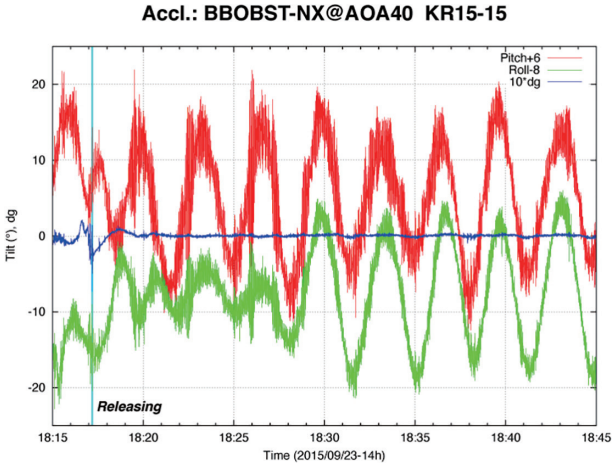


図 6.　BBOBST-NX での最初の傾斜変動測定．KR15-15 航海で BBOBST-NX を日本海溝陸側斜面の地点（水深 5400 m）に投入した際に，DSALOG で記録された降下中の傾斜変動．着底時刻（15 時 16 分 41 秒付近）を含む 1 分間を示している．水平 2 成分の加速度値から Pitch/Roll（度，赤/緑）の傾斜へ換算している．また鉛直成分は重力加速度を差し引き 5 倍した値（5*dg，青）である．着底時に発生している最大加速度は 2.2 g 程度とそれほど大きくはない．



（A）



（B）

図 7.　NX-2G で傾斜変動を抑制した際の測定結果．（A）2016 年 10 月に釜石沖の地点（水深 1570 m）で NX-2G の機能試験を行った際に DSALOG で得た傾斜変動，海面からの投入時刻を含む 30 秒間を示す．NX-2G の本体には 10 m 長のロープを介してガラス球フロートが付いている．（B）比較として，図 6 の BBOBST-NX 投入時の投入前後 30 秒間の傾斜変動を示す．共に，“Releasing” と示した水色の縦線のタイミングで海面からの自由落下を開始している．（A）でフロートが海中に引き込まれる迄は，（B）と同様に大きな傾斜変動を起こしているが，降下速度（約 1.5 m/秒）に見合う時刻（“Sinking float”）から，フロートによるロープの張力が働き，傾斜変動の振幅が効果的に抑制されたことが分かる．なお，（A）と（B）ともに傾斜値は右上の凡例に示す数値だけ上下にシフト，鉛直加速度変化は 10 倍して表示されている．

る原理を簡単に説明すると，浮力体（ガラス球フロート）を記録部と 10 m 程度のロープで，NX-2G 記録部の赤道部において均等に 3 点で結束することで，降下中に記録部で傾斜が発生し始めると，浮力体の浮力によるロープの張力がそれを抑制する様に働くものである．NX-2G の場合，自己浮上回収に必要な浮力が，記録部のチタン球耐圧容器の残浮力だけでは不足するので，この浮力体を追加することは必須条件であった．

その後の NX-2G の長期試験観測（2017 年実施，Shiobara *et al.*, 2019），BBOBST-NX の設置時（2020 年実施）にもこの DSALOG を使用しており，それぞれの観測機器を海面から投入した後の降下中で，傾斜変動が抑制されているかを，DSALOG 回収後に確認している．後者の場合には，潜水艇による展開作業開始までに，付加した浮力体とロープを記録部から分離している．

ま　と　め

主たる開発研究（NX-2G）のために，DSALOG を独自開発・運用し，十分な結果を得ることができた．自由落下する観測機材の挙動を知り，着底時傾斜への有効な対策とその効果の確認が取れたのが最大の成果である．NX-2G だけでは無く，BBOBS-NX/BBOBST-NX の設置方法の改善にも DSALOG（と DSCAM）は有用であった．

謝　辞：本開発研究での観測は，海洋研究開発機構の研究船「なつしま」・「ハイパードルフィン」・「かいれい」・ROV「かいこう 7000II/Mk-IV」および海洋エンジニアリングの第一開洋丸・KAIYO3000 による，NT15-12・KR15-15・KR17-06・KR18-13 航海で実施され，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．

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

3 軸加速度センサーモジュール ADXL345, 2013, https://akizukidenshi.com/catalog/g/gM-06724/,（参照 2021-09-20）.
3 軸加速度センサーモジュール LIS3DH, 2013, https://akizukidenshi.com/catalog/g/gK-06791/,（参照 2021-09-20）.
Altium Designer, 2006, https://www.altium.com/altium-designer/,（参照 2021-09-20）.
E1 エミュレータ，2012, https://www.renesas.com/jp/ja/software-tool/e1-emulator-r0e000010kce00-discontinued-product,（参照 2021-09-20）.
FatFs 汎用 FAT ファイルシステム・モジュール，2009, http://irtos.sourceforge.net/FAT32_ChaN/doc/00index_j.html,（参照 2021-09-20）.
HEW（統合開発環境 High-performance Embedded Workshop），2012, https://www.renesas.com/jp/ja/software-tool/high-performance-embedded-workshop,（参照 2021-09-20）.
Intelligent Depth Sensors（8CB7000-I），2008, http://www.paroscientific.com/pdf/D50_Series_8000.pdf,（参照 2021-09-20）.
LPS25H 使用気圧センサーモジュール DIP 化キット，2015, https://akizukidenshi.com/catalog/g/gK-13460/,（後継品，参照 2021-09-20）.
P 板.com, 2002, https://www.p-ban.com,（参照 2021-09-20）.

RX621 マイコンボード，2011，https://akizukidenshi.com/catalog/g/gK-05112/，（参照 2021-09-20）.

Shiobara, H., T. Kanazawa and T. Isse, 2013, New step for broadband seismic observation on the sea floor : BBOBS-NX, *IEEE-JOE*, **38**, 396-405, doi : 10.1109/JOE.2012.2222792.

塩原　肇・篠原雅尚・中東和夫，2014，観測帯域拡大への高精度圧力計付き広帯域海底地震計の開発，海洋調査技術，**26**，1-17.

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 BBOBST-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, S05a, IUGG19-0453.

塩原　肇・杉岡裕子・太田豊宣・大西信人，2020，―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，震研技報，**26**，1-9，doi : 10.15083/0002000512.

Shiobara, H., A. Ito, H. Sugioka, M. Shinohara and T. Sato, 2021, Tilt observations at the seafloor by mobile ocean bottom seismometers, *Front. Earth Sci.* **8**, 599810, doi : 10.3389/feart.2020.599810.

ST マイクロ L3GD20 使用 3 軸ジャイロセンサーモジュール，2015，https://akizukidenshi.com/catalog/g/gK-15096/，（後継品，参照 2021-09-20）.