

### 自律型潜水調査機器「ごんどう」の運用<sup>†</sup>

栗田洋和<sup>\*1</sup>, 瀬田英憲<sup>\*2</sup>, 梅田安則<sup>\*2</sup>, 南 宏樹<sup>\*3</sup>,  
井城秀一<sup>\*2</sup>, 大泊理八<sup>\*2</sup>, 橋詰未来<sup>\*2</sup>

#### Operation of the Autonomous Underwater Vehicle *Gondou*<sup>†</sup>

Hirokazu KURITA<sup>\*1</sup>, Hidenori SETA<sup>\*2</sup>, Yasunori UMEDA<sup>\*2</sup>, Hiroki MINAMI<sup>\*3</sup>,  
Hidekazu INOSHIRO<sup>\*2</sup>, Rihachi ODOMARI<sup>\*2</sup>, and Miku HASHIZUME<sup>\*2</sup>

#### Abstract

Japan Coast Guard started operating the Autonomous Underwater Vehicle *Gondou* in April 2013. We describe the work process for the performance of our AUV and the result of bathymetric survey with the multibeam echo sounder and the result of side scan sonar survey.

#### 1 はじめに

海上保安庁は、海洋基本法及び海洋基本計画において、我が国領海及び排他的経済水域における海洋権益の保全及び海洋の総合的管理に必要な詳細な海底地形データなどの基盤情報の収集・整備を求められていることから、海洋調査能力を向上させ、詳細な海底地形データ等を収集するために、自律型潜水調査機器（AUV: Autonomous Underwater Vehicle）（Photo 1）を導入した。AUV は、海底近傍まで潜航し、あらかじめプログラムされた経路を自律航走して調査を行う海洋調査機器である。2013 年 4 月から測量船「拓洋」を母船として運用を開始した AUV の概要、作業工程及び調査成果について記載する。

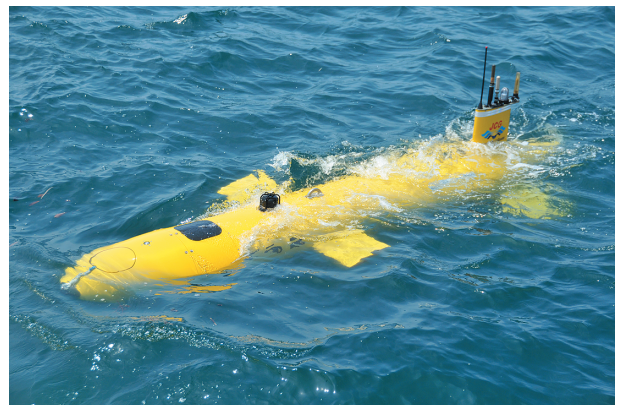


Photo 1. Autonomous Underwater Vehicle *Gondou*.

写真 1. 自律型潜水調査機器「ごんどう」。

#### 2 AUV の概要

AUV の概要及び AUV に搭載されている調査機器を Table 1 に示す。この他 AUV には、海中で位置を正確に推定するための慣性航法装置、潜航

<sup>†</sup> Received October 16, 2013 ; Accepted December 24, 2013

\*1 技術・国際課海洋研究室 Ocean Research Laboratory, Technology Planning and International Affairs Division

\*2 海洋調査課大陸棚調査室 Continental Shelf Surveys Office, Hydrographic Surveys Division

\*3 海洋調査課 Hydrographic Surveys Division

Table 1. An outline of the AUV and the some survey devices mounted on the AUV.

表 1. AUV の概要及び搭載されている調査機器.

愛 称	ごんどう
全 長	4.3 m
重 量	610 kg
最大速度	5 knots
最低高度	5 m
最少旋回半径	10 m (3 knots 時)
最大上昇角度	45 度
調 査 機 器	マルチビーム音響測深器 (MBES)
	サイドスキャンソナー (SSS)
	表層音波探査装置 (SBP)
	CTDセンサー
	超音波多層流向流速計 (ADCP)

中の位置を計測する音響測位装置, 潜航中の AUV と情報の送受信を行う音響通信装置, AUV が海面に浮上したときに海面での位置を知らせる無線通信装置, 衛星通信装置及びラジオビーコン等が搭載されている。

なお, AUV の愛称「ごんどう」は, 2012 年 11 月から 12 月にかけて一般公募を行い, 審査の結果, 決定した。愛称の由来となった「ごんどうくじら」の大きさが当庁の AUV とほぼ同等であること, また, 海面と海中を行き来するところが海底を調査して海面に戻ってくる AUV にふさわしいことが選定理由である。

### 3 作業工程

AUV による調査には, 機材準備, ミッションプランの検討・作成・点検, FRT (Fault Response Table) の確認, プレダイブチェック, ブリーフィング, 投入作業, ダイブ (潜航, 調査, 浮上), 回収作業, ポストダイブチェック, 機材整備の 10 種類の作業工程が存在する。以下にこれらの作業を記載する。

#### 3.1 機材準備

AUV による調査では, AUV 本体のほか, AUV の投入・回収を行う投入回収装置 (LARS: Launch

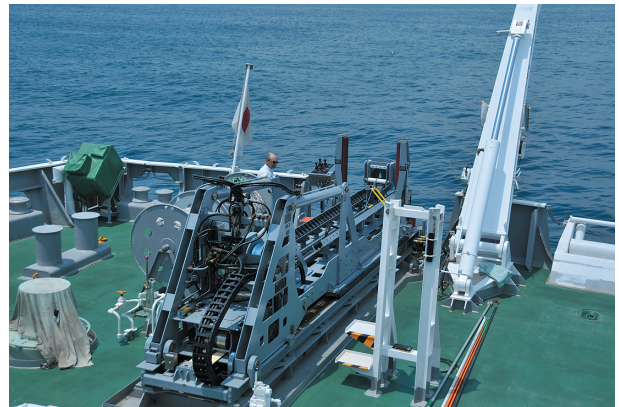


Photo 2. Launch And Recovery System "LARS".

写真 2. 投入回収装置 "LARS".

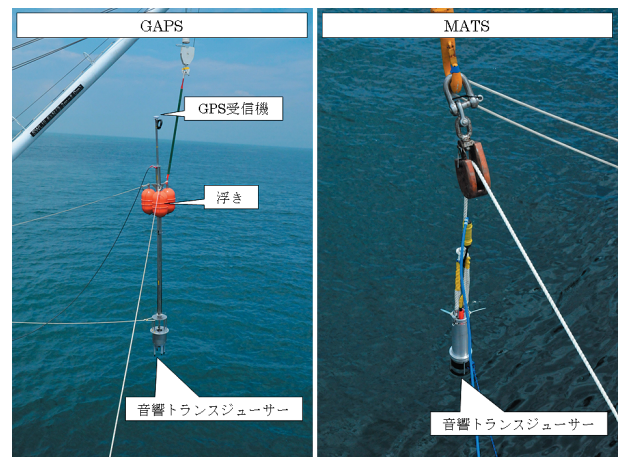


Photo 3. Global Acoustic Positioning System "GAPS" and Multi-modulation Acoustic Telemetry System "MATS".

写真 3. 音響測位装置 "GAPS" と音響通信装置 "MATS".

And Recovery System) (Photo 2), 船上で AUV を制御・監視する船上支援装置 (SCC: Surface Control Computer), 潜航中の AUV の位置を計測する音響測位装置, 潜航中の AUV と情報の送受信を行う音響通信装置, 海上の AUV のラジオビーコンからの電波を受信する方位探知機, AUV を無線操縦する Belly Pack などの準備が必要となる。なお, 音響測位装置として GAPS (Global Acoustic Positioning System), 音響通信装置として MATS (Multi-modulation Acoustic Telemetry System) を用いている (Photo 3)。また, 音響通信装置は SCC に接続され, SCC で制御されている。

### 3.2 ミッションプランの検討・作成・点検

AUVはあらかじめ与えられたプログラムに基づき、潜航し、調査を行い、浮上する。潜航から浮上までのAUVの行動が記載されているプログラムをミッションプランと呼び、ミッションプランは専用コンピュータMPW (Mission Planning Workstation) の専用ソフトウェアCoMMIで作成される。ミッションプランは複数の点の組み合わせで作成され、各点にラベルと呼ばれる番号が付けられる。ラベルには緯度・経度及びAUVの様々な設定(速力、使用する調査機器など)が記載されている。なお、AUVが一旦ミッションを開始してしまうと、ミッションプランの変更(測線の追加、潜航高度・深度の変更、速力の変更など)はできないため、ミッションプランの検討・作成・点検はとても重要である。

ミッションプランを検討する時は、最低でも次の2点に注意する。1) AUVの性能を理解し無理な計画を立てない。2) 取得データの品質の基準を決める。例えば、詳細な海底地形を把握する目的の調査では、解像度の高いデータを取得したいが、そのためには海底に近づく必要がある。しかし、複雑な地形の海域で高度を低く設定すること(より海底に近づくこと)は危険を伴うため、速力を落とすことで危険察知から回避行動に移るまでの時間を確保して、AUVの潜航の安全性を確保するとともに、解像度の高いデータを取得する。このような検討を行い、調査に必要なAUVの設定(潜航高度または深度、速力、測線の長さ、測線間隔及び使用機器の設定値など)を決める。なお、ミッションプランには、AUVの潜航・浮上位置の情報も含まれるため、これらの点も検討の対象である。

検討が全て終わると、ミッションプランの作成である。まず、調査測線の作成について説明する。1) 本日の測線の緯度・経度、測線の長さ、測線の数、測線間隔、潜航高度・深度、速力及び使用する調査機器を設定すると、測線の始点と終点のAUVの情報が作成される。次に、AUVを潜航させる点及びAUVを浮上させる点の作成であ

```

: Mission end (label 100)
: .....
entry_label,100
stop_timer
start_timer,4000
circle_current, 25.0, depth, 0.0, inu, 1.5, depth, -1.0 // Surface
set, THRUSTER, OFF
set, STOP_MODE, ON
stop_timer

#####
: 300 Begin Task Dive (010_Bob)

: 310 Begin Task Transit
entry_label, 310
start_timer, 1200
target,49.337419310,-122.894048842,5,ignore,0,inu,1.54333,depth,10
stop_timer
: End Task Transit

: 320 Begin Task PathTracking
: 320 Command Task SetTask
entry_label, 320
set,BROADCAST,1

entry_label, 330
start_timer, 88
line_follow,49.336596918,-122.894128206,5,ignore,0,inu,1.54333,depth,10
stop_timer
entry_label, 340
start_timer, 96
line_follow,49.335751993,-122.894598798,5,ignore,0,inu,1.54333,depth,10
stop_timer
: End Task PathTracking

: 350 Begin Task PathTracking
: 350 Command Task SetTask
entry_label, 350
set,BROADCAST,1

entry_label, 360
start_timer, 1200
line_follow,49.335744876,-122.894604393,5,ignore,0,inu,1.54333,depth,0
stop_timer
entry_label, 370
start_timer, 193
line_follow,49.337434720,-122.895545609,5,ignore,0,inu,1.54333,depth,0
stop_timer
: End Task PathTracking

: End Task Dive (010_Bob)
goto, 100

```

Fig. 1. Example of mission plan (International Submarine Engineering Ltd., 2013 a).

図 1. ミッションプランの例 (International Submarine Engineering Ltd., 2013 a).

る。AUVの潜航及び浮上は直線的に行われるのではなく、設定した緯度・経度を中心とした円や8の字を描くように行われる。そのためここでは、緯度・経度、目標深度又は高度、速力、調査機器のON又はOFFの他に、AUVが描く円の半径なども設定する。測線の始点・終点、潜航位置などの情報が集まってミッションプランとなる (Fig. 1)。

最後にミッションプランの点検である。現在、点検項目は54項目あり、今後、私たちの運用に

**AUVミッションプラン チェックシート**

確認者: \_\_\_\_\_  
 日時: \_\_\_\_\_ / \_\_\_\_\_ : \_\_\_\_\_

**CoMMI上のミッション**

1 キャンペーン (Campaign) とミッション (Mission) 名  
 Campaign: \_\_\_\_\_  
 Mission: \_\_\_\_\_

2 ミッションの目的  
 \_\_\_\_\_

3 調査測線は目的に合っているか? Yes:  No:

4 ミッションの総距離 (時間) \_\_\_\_\_

5 ミッションの総距離に対して、現在のバッテリー残量で十分か? Yes:  No:

6 調査海域の地形に対して適切な水深設定か? Yes:  No:

7 調査海域の地形に対して適切な高度設定か? Yes:  No:

8 タスク完了時の半径 (Radius) の大きさは十分か? Yes:  No:

9 調査終了位置と浮上予定位置は近いか? Yes:  No:

**ミッションプランとCoMMI**

10 ミッションプランファイル名 \_\_\_\_\_

11 作成日時 \_\_\_\_\_ / \_\_\_\_\_ : \_\_\_\_\_

12 テンプレート (Template) \_\_\_\_\_

13 テンプレートのバージョン \_\_\_\_\_

**テンプレートの初動 (initial loiter) と潜行ラベル (descent labels) の点検**

14 ミッションフェーズは適切にセットされているか? Yes:  No:

15 航行センサー (DVL, OAS/BAS) は、安全なオペレーションを行う中でエネルギーの消費が最小となるように電力が供給されているか? Yes:  No:

16 ベイロードセンサー (MBES, SSS, SBP) は、データをロスすることなく、エネルギーの消費が最小となるように電力が供給されているか? Yes:  No:

17 水深/高度の値は適切か? Yes:  No:

18 速度の値は適切か? Yes:  No:

Fig. 2. Mission plan review form.  
 図 2. ミッションプラン点検用紙.

合わせ見直す必要がある (Fig. 2).

3.3 FRT 確認

次に、FRT (Fault Response Table) の確認である。FRT とは、AUV が異常を検知したときにとる AUV の対応を記載したリストである (Fig. 3)。FRT に記載されている AUV の動作には、Ignore (無視して調査続行)、Stop (停止)、Surface (浮上) などがあり、どの異常を検知したときも音響通信装置により SCC へ報告される。例えば、1) データ収録ディスクの空き容量が少ないなど、AUV の動作に支障のないトラブルの場合は、調査を続行させる Ignore の動作をとる。2) スラスタの回転数が高いなど、AUV の動作に異常はあるが、浮上させるまでではない場合は、MBES (Multi Beam Echo Sounder)、SSS (Side Scan Sonar) 及び SBP (Sub Bottom Profiler) のピング、スラスタなどを一時停止させる Stop

```
// (C) International Submarine Engineering Ltd. 2013,,,,
// JCG AUV Fault Response Table,,,,
//,,,,
EXCEPTION, BEGIN, //,,
//,,,,
// Exception states,,,,,
    ,define,state,Stop,1, //
    ,define,state,Fault,2, //
    ,define,state,Pilot,3, //
    ,define,state,Mission_0,4, //
    ,define,state,Mission_1,5, //
    ,define,state,Mission_2,6, //
//,,,,
// Exception faults,,,,,
    ,define,fault,vcc_wa_alarm_ch1,1, //
    ,define,fault,vcc_wa_alarm_ch2,2, //
    ,define,fault,vcc_wa_alarm_ch3,3, //
    :
    :
    ,define,fault,vcc_gf_alarm_ch0,9, //
    ,define,fault,vcc_gf_alarm_ch1,10, //
    ,define,fault,vcc_gf_alarm_ch2,11, //
    ,define,fault,vcc_gf_alarm_ch3,12, //
    :
    :
    ,define,fault,vcc_plane_1_alarm,26, //
    ,define,fault,vcc_plane_2_alarm,27, //
    :
    :
    ,define,fault,vcc_plane_status_alarm,32, //
    ,define,fault,vcc_pos_depth_alarm_low,33, //
    ,define,fault,vcc_pos_depth_alarm_high,34, //
    ,define,fault,vcc_pos_pitch_alarm,35, //
    ,define,fault,vcc_pos_roll_alarm,36, //
    ,define,fault,vcc_thruster_rpm_alarm_high,37, //
    ,define,fault,vcc_thruster_current_alarm_high,38, //
    ,define,fault,vcc_pos_altitude_alarm_low,39, //
    ,define,fault,vcc_battery_volts_alarm_low,40, //
    ,define,fault,vcc_battery_current_alarm_high,41, //
    ,define,fault,vcc_depth_sensor_alarm,42, //
    ,define,fault,vcc_energy_remaining_low_alarm,43, //
    ,define,fault,vcc_energy_remaining_low_warning,44, //
    ,define,fault,vcc_thruster_status_alarm,45, //
    ,define,fault,vcc_altimeter_down_timeout_alarm,46, //
    ,define,fault,vcc_altimeter_down_quality_alarm,47, //
    ,define,fault,vcc_dgps_timeout_alarm,48, //
    ,define,fault,vcc_dgps_quality_alarm,49, //
    ,define,fault,vcc_gtelem_timeout,50, //
    ,define,fault,vcc_mission_timeout_alarm,51, //
    ,define,fault,vcc_mission_mgr_jump_fault,52, //
    ,define,fault,vcc_mission_mgr_execution_alarm,53, //
    ,define,fault,vcc_mission_mgr_mission_completed,54, //
    ,define,fault,vcc_hull_temperature_degC_alarm_high,55, //
    ,define,fault,vcc_ctd_timeout_alarm,56, //
    ,define,fault,vcc_battery_timeout_alarm,57, //
```

Fig. 3. Example of fault response table (International Submarine Engineering Ltd., 2013 a).  
 図 3. フォルトレスポンステーブル (FRT) の例 (International Submarine Engineering Ltd., 2013 a).

の動作をとる。3) 慣性航法装置に異常があるなど、AUVにとって重大な問題がある場合は、「MBES, SSS及びSBP」を停止し、AUVが右回頭で浮上するようにプレーンとスラスターが調整されるSurfaceの動作をとる。

Stopの例としては、最大水深200mの海域を高度50mで潜航する調査において、AUVの最大潜航水深値を160mに設定した場合、潜航水深が160mを超える異常をAUVが検知したときにFRTが作動し、AUVは停止する。SCCに表示されている情報からAUVの状態を確認し、調査継続可能と判断すればミッションを再開、調査継続不可能と判断すれば浮上させる。どちらの指示もSCCを用い音響通信装置から送られる。

### 3.4 プレダイブチェック

ここではAUVの状態をハードウェアの側面及びソフトウェアの側面から点検する (Fig. 4)。この作業は、潜航を必要としない海上での操縦訓練でも必要で、10種類の作業工程の中で最も重要と言える。この作業で問題が発見された場合、問

題が解決されるまで潜航させることはできない。それは、問題を無視して潜航 (調査) させたことが原因で、大きな問題を引き起こすことも考えられるからである。

ハードウェアの側面からは、ネジやコネクタの緩み、オイル漏れ、オイル量、見た目の異常 (傷など) などの点検が行われ、ソフトウェアの側面からは、GPSの受信、AUVとSCC間の無線通信、ラジオビーコン等の受信状況、調査機器の動作及び収録、プレーン・スラスターの動作、安全装置の作動点検などが行われる。

### 3.5 ブリーフィング

ブリーフィングは、AUV投入直前に、測量船乗組員を含めた作業員総員で、調査内容、作業スケジュール、海況、注意事項などを再確認する工程で、意思疎通・情報共有をはかることで、総員の気を引き締めるとともに安全意識を高め、作業中の事故やミスを未然に防ぐ目的で実施される。また、海況に応じて、投入ポイントの変更、荒天による調査中止の判断を下すこともある。

### 3.6 投入作業

まず、GAPS及びMATS (以下、「音響機器」という) を船外に繰り出す。これは、AUV投入後直ぐに音響機器を海中に投入し、音響測位及び音響通信を行う準備である。GAPSは約4.5mのポールに取り付けられ、「拓洋」左舷クレーンを用いて海面下約3mまで降ろされ、MATSは海面下15m程度まで降ろせるロープに取り付けられ、「拓洋」左舷ギャロスを用いて投入される。その後、AUVの投入である。投入後にAUVが「拓洋」と接触することを防ぐため、投入作業は「拓洋」を微速前進状態に保ち行われる。AUVの投入はLARSを用い、LARSから切り離された後 (Photo 4)、Belly Packによる遠隔操縦でAUVは「拓洋」から離される。最後に、「拓洋」を行き足のない状態に保持し、音響機器が流されないように投入する。

なお、LARSとBelly Packの操作は、海況に応

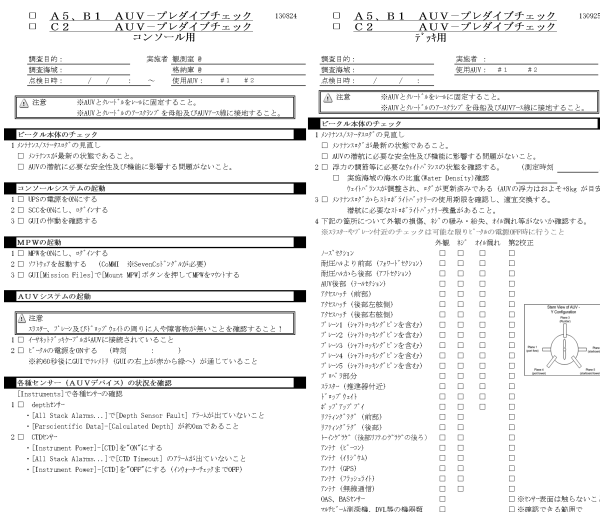


Fig. 4. (Left) Part of the console pre-dive check sheet. (Right) Part of the on-deck pre-dive check sheet (International Submarine Engineering Ltd., 2013 b).

図4. プレダイブチェックシートの一部 (左:コンソール用, 右:デッキ用) (International Submarine Engineering Ltd., 2013 b).

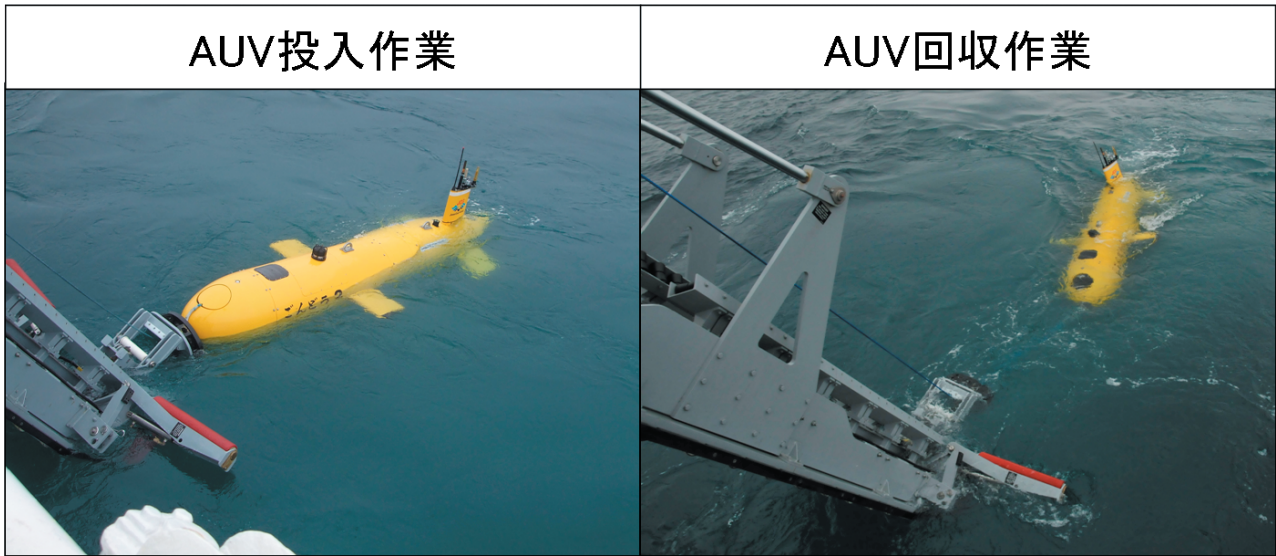


Photo 4. (Left) Launching the AUV. (Right) Recovering the AUV.  
写真4. AUV投入回収作業 (左:投入, 右:回収).

じた対応が必要となるため、交代の多い陸上職員(上乗り班員)ではなく、「拓洋」や海況に詳しい「拓洋」乗組員(観測科)が行う。

### 3.7 ダイブ

投入後、AUVが「拓洋」から十分に離れたことを確認し、SCCよりミッション開始のコマンドを送る。ダイブ中は観測室に設置されているSCC、MPW及び音響測位制御装置を用いてAUVのモニタリングを行う。SCCではAUVとの通信やAUVの状況(経緯度、深度、針路、速度など)確認を行う。AUVが異常を検知した時も、SCCに情報が送られるため、SCCのモニタリングが最も重要になる。MPWにはAUVと「拓洋」の位置が表示されるため、AUVの調査状況及び両者の位置関係を確認することができる。音響測位制御装置はGAPSによる測位位置(「拓洋」から方位、水平距離、垂直距離など)を表示・収録している。

なお、AUVと「拓洋」の位置関係やAUVによる調査の進行具合は、船橋及び後部指揮と共有する。「拓洋」が風や海潮流によって流され、音響機器によりAUVと通信が困難な状態となった時やAUVが緊急浮上した時に、音響機器が海中にある状態では航走できないことから、音響機器を

海面上に吊り上げる作業をスムーズに行うためでもある。

### 3.8 回収作業

潜航調査が終了し、AUVが海面に浮上してきたらミッション終了・回収作業となる。AUVを浮上させる前に浮上予定地点付近の海上の様子を確認し、クリアなら浮上させる。「拓洋」は浮上予定地点から200mほど離れた場所で待機し、AUV浮上直前までSCC、MPWでAUVをモニタリングする。AUVが浮上すると、ラジオビーコンにより方位探知機が反応したり、無線又は衛星通信によりAUVの位置がMPWに表示されるため、AUVの浮上を確認できる。距離が近いときは即座にAUVは発見されるが、距離が遠いときは、MPWに表示されるAUVの位置情報に基づき「拓洋」を移動させる。AUV発見後、「拓洋」の船首から風・波を受け、AUVが船尾に来るように「拓洋」を移動、その後、Belly Packによる遠隔操作でAUVを「拓洋」の船尾に近づけて、AUV頭部から回収用のブイ(Pop-up Buoy)をリリースさせる。リリースのスイッチはBelly Packに付いているため、Belly Pack操作者がタイミングを計り、Pop-up Buoyをリリースさせる。Pop-up Buoyには回収用に約18mのロープ

が付いており、ロープを四つ目錨やフックで引っ掛けて、Pop-up Buoy 及びロープを「拓洋」に回収、回収したロープを LARS のウインチに取り付けて AUV を巻き上げ、回収となる。ウインチを巻く時は、ロープが AUV のプレーン等に絡まないように、常にロープにテンションをかけなければならない。そのため、「拓洋」を微速前進、AUV を微速後進した状態に保ち慎重に行われる (Photo 4)。

### 3.9 ポストダイブチェック

ポストダイブチェックは、主にハードウェアの側面 (見た目の異常、オイルの状況など) から点検を行い、最後に真水による AUV の洗浄を行う。観測室では各センサーの電源断の確認を行うとともに、AUV にイーサネットケーブルを接続後、取得データのダウンロードなどを行う。また、バッテリー残量が次のミッションに対して十分か確認し、必要であれば充電を行う。

### 3.10 機材整備

行動の最後に AUV をはじめとする全ての機材の整備を行う。海上で使用した機材は海水による塩害対策を施す必要がある。まず、真水で良く洗い、良く乾燥させる。錆び易い機材には防錆、コ

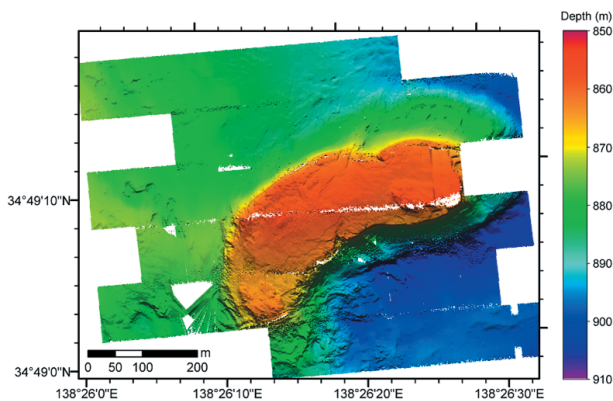


Fig. 5. Result of topographic survey with the multi-beam echo sounder at an altitude of 50 m above seafloor with water depths ranging 850 to 900 m.

図 5. マルチビーム音響測深器の測量結果 (水深 850 ~ 900 m, 高度 50 m)。

ネクタ部には防水対策を施す等、次の調査で機器の不具合が起こらないように、十分な整備を実施する。整備に必要な消耗品が不足しないように用意することも必要である。

## 4 成果

2013 年に駿河湾で実施した慣熟訓練で取得した海底地形調査及びサイドスキャンソナーの成果を紹介する。

海底地形調査は、水深 850~900 m, 高まりの比高 30~40 m の海域で実施した。AUV の潜航高度を 50 m としたため、直下のフットプリントは約 1 m となっている。「拓洋」のマルチビーム音響測深器を使用した場合、水深 800 m の海域では直下のフットプリントは約 30 m となり、単純に考えて約 30 倍の分解能となっている。そのため、AUV を使用することにより海底地形をより詳細に把握することができた (Fig. 5)。

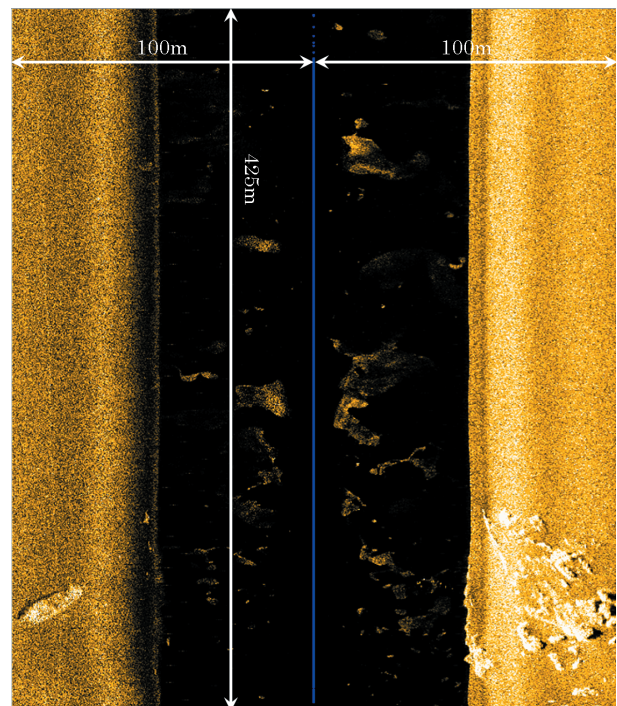


Fig. 6. Result of side scan sonar survey at an altitude of 50 m above seafloor with water depths of about 130 m.

図 6. サイドスキャンソナーの測量結果 (水深約 130 m, 高度 50 m)。

サイドスキャンソナーによる調査は、水深約 130 m の海域で、AUV の潜航高度を 50 m として実施した。Fig. 6 の左下には、沈船と判断できる画像（両舷、船首及び船尾のような形状）も確認できた。以前、この海域を調査した測量船「昭洋」の海底地形調査では、今回確認できた沈船は、小さな高まりであったため、AUV を使用することで海底の障害物の詳細な情報を得ることができた。

## 5 おわりに

海上保安庁で、AUV を運用するにあたり、2012 年 10 月から 2013 年 3 月まで測量船「拓洋」の大改修を行った。

2013 年 4 月から運用を開始した AUV は当庁で初めて導入した機器であるため、試行錯誤を繰り返しながらの運用となっている。今後、AUV を円滑に、効率的に運用し、詳細な海底地形データ等を効率良く収集するため、昼夜問わず運用することが求められている。そのため、関係者のさらなる経験・習熟が必要と思料する。

今後、詳細な海底地形データ等の収集・整備のため、AUV を円滑に、効率的に運用するにあたり本稿が役立つことを望む。

## 文 献

International Submarine Engineering Ltd. (2013 a)  
JapanCoast Guard Explorer 27-B 08-2500  
AUV Control System User Manual, 158 pp.

International Submarine Engineering Ltd. (2013 b)  
JapanCoast Guard Explorer 27-B 08-2500  
AUV Pre/Post Dive Checklist, 13 pp.

## 要 旨

海上保安庁は、2013 年 4 月から自律型潜水調査機器「ごんどう」の運用を開始した。最新の機器である AUV の作業工程に重点を置き、機器概要及び成果の速報を合わせて記載する。