

航行型 AUV を用いた海底マッピングに要求される 音響機器発振タイミング管理[†]

長澤亮佑^{*1}, 牛島 学^{*1}, 堀之内龍一^{*1}, 坂本和陽^{*1}, 川上友希^{*1}, 水谷悠馬^{*1}, 住吉昌直^{*2}

Acoustic transmission timing management required for seabed mapping
using cruising-type autonomous underwater vehicles[†]

Ryosuke NAGASAWA^{*1}, Manabu USHIJIMA^{*1}, Ryoichi HORINOCHI^{*1}, Kazuaki SAKAMOTO^{*1},
Tomoki KAWAKAMI^{*1}, Yuma MIZUTANI^{*1}, and Masanao SUMIYOSHI^{*2}

Abstract

The cruising-type AUV is an autonomous underwater vehicle that has advantages in acoustic seafloor mapping, i.e., the acquisition of seafloor topographic data and acoustic images. This report summarizes the practical points to be considered in AUV operations from the operators' point of view regarding the transmission timing management of acoustic equipment. Along with the requirements for maneuvering stability and quality control of observation data, the key points related to the corresponding oscillation timing management are presented with an example implemented to the AUVs onboard the S/V *Heiyo*.

1 はじめに

自律型の水中ロボットである AUV (Autonomous Underwater Vehicle) は、海洋観測や海洋安全保障、海底下の資源開発といった幅広い文脈で供され、その使用は拡大している。海上保安庁海洋情報部でも、平成 25 (2013) 年、我が国の領海及び排他的経済水域における海洋権益の保全や海洋資源の開発等、海洋の総合的管理に必要となる基盤的情報の収集・整備を目的として AUV を導入した。この AUV を用いた海底マッピングによって、これまでに水深 1000 m 以深の未詳の海底火山・熱水活動域といった数多くの詳細な海底地形等が明らかになり (南, 2021)、沖縄トラフにおける火成活動の理解に貢献するなどの活躍を見せ

ている。

当部が運用する AUV は航行型 (cruising-type) に分類される。航行型 AUV は、一般に魚雷型 (torpedo-shaped) と形容される形状の機体を持ち、3 kt 程度と比較的高速で海底を追従しながら航行することを得意とする (長澤・他, 2023)。急峻な地形でない限りは海底からの距離を一定に保つての航行ができるため、一般にマルチビーム測深機やサイドスキャンソナーといった音響観測機器を搭載し、海底面を均一かつ高い精度でマッピングする観測においてその真価を発揮する。高品質の海底マッピングのためには、観測のための音響信号をある望ましい頻度で発振する必要がある。しかし一方で AUV は潜水型のプラッ

[†] Received August 19, 2024; Accepted October 10, 2024

* 1 大洋調査課 Offshore Surveys Division

* 2 技術・国際課 Technological Planning and International Affairs Division

トフォームであるため、その航法や母船との通信のためにも様々な音響信号を用いる。そのため、望む精度での海底マッピングを実現するためには、観測に用いる音響信号の発振を適切に管理し、航法や通信といった必要不可欠な音響信号との相互の干渉を回避することが求められる。本稿では、航行型 AUV に求められる音響信号の発振タイミング管理について、AUV 運用者の立場から考慮が必要な要素についてまとめる。特に、令和 2 (2020) 年の測量船「平洋」就航にあたり新たに加わった、当部の航行型 AUV 「ごんどう 3」及び「ごんどう 4」(以下「平洋搭載型 AUV」という。) における実例を交えて紹介する。

2 AUV による海底マッピングの特性

2.1 使用される音響機器

航行型 AUV を用いた海底マッピングにおいては、スワス音響測深機やサイドスキャンソナーといった音響機器の使用が一般的である。スワス音響測深機は、クロスファンビーム方式等によるマルチビーム測深機 (multibeam echo sounder) とインターフェロメトリ測深機 (バシメトリック・サイドスキャン; bathymetric sidescan) に大別されるが、いずれの方式についても AUV 向けの機種が各社からリリースされている。海底に接近して観測できる AUV の特性から、測深機は有効レンジが 100–200 m 程度あれば十分であるため、高い観測分解能が期待できる高周波型 (一般に 200–400 kHz 帯) の測深機が用いられる。

AUV はまた、航法のために各種の音響機器を用いる。機体の対地移動速度を検知するためのドップラ式速度ログ (DVL; Doppler Velocity Log) や周囲の障害物探知のための各種ソナーがこれに該当する。特に DVL は AUV の航法に不可欠であり、慣性航法装置を用いた自機位置のリアルタイム推定の精度を大きく向上させる。DVL も観測機器と同様、数十 m から百数十 m という AUV の観測高度において機能させるため、数百 kHz の発振周波数をもつ機種が一般に用いられる。

外部との通信においても、AUV は音響信号を活用する。母船との間で情報のやり取りを行うための水中通信と、AUV の位置を GNSS 測位との結合によって高精度に求める水中測位がこれに該当する。当部が運用する AUV のように運用深度 1000 m 以上の深海向け水中機では、母船から水中機までの距離が数 km に及ぶため、10–20 kHz 帯の比較的低周波の装置が用いられる。

2.2 音響機器の発振に係る条件

DVL は AUV の航法に不可欠であり、対地速度情報が供給されなくなると慣性航法に大きな誤差を生じ、測線の追従に支障をきたす。一例として、当部の平洋搭載型 AUV に搭載されている iXblue (現 exail) 社製慣性航法装置 PHINS の場合、その位置推定精度は DVL を併用すれば進行距離の 0.1% 程度であるとされる。これは速力 3 kt で 1 時間航行した場合に誤差数 m 程度という高い測線追従性能を担保するものであるが、DVL を使わず PHINS 単体で航行した場合には誤差は 1 時間で 1000 m 以上にまで悪化するとされている (iXblue, 2016)。そのため、AUV が海底近傍での安定航行にある間は、DVL はできる限り高頻度で安定的に発振させることが不可欠である。平洋搭載型 AUV では、製造元の推奨する最低限の発振頻度として 1 秒に 1 回、DVL による対地速度測定を行うこととしている。また、障害物検知のためのソナーについても、障害物回避に十分な猶予を与えるため、できる限り高頻度での発振が望ましい。平洋搭載型 AUV では 1 秒に 1 回の発振を確保することとしている。

観測機器についても、海底面を稠密に、一定以上の分解能でマッピングするためには高頻度での発振が望ましい。但し、発振頻度が高すぎる場合には直前の発振によるエコーを受信している最中に自身が発振することでデータに干渉ノイズを生じるため、海底面までのレンジに応じた調節を要する。航行型 AUV の場合には海底面から一定の距離を保っての観測が一般的であるから、発振頻度は調査高度に応じて予め定めておくことが可能

である。また、航法や通信といった他の音響信号も観測データへのノイズ源となることがあるため、その発振タイミングには注意を要する。

通信機器は、常に発振させておく必要はないが、必要なときに必要な情報を伝達できるような設定が求められる。水中測位については、高精度なトラッキングのためにはやはり高頻度での発振が望ましいが、AUVの航行する深度に依存して最適な音響発振の間隔は変化する。特に運用深度が1000 mを超えるような深海型のAUVではレンジが長大になるため、音響信号の伝搬に数秒を要し、そのため発振頻度は1 Hzを下回ることとなる。

2.3 一般的な水路測量との違い

前述のとおり、AUVの安定的な航行や高い分解能での観測のためには、あらゆる機器をできるだけ高頻度に発振することが本来望ましいと考えられる。その上で、観測データやその他信号との相互の干渉を回避するべく、適宜タイミング調整が必要となる。そのため、AUVには正確に時を刻む内部時計を備え、かつ観測機器については外部からのトリガにより発振する機構が備わる必要がある。これは、観測機器の発振間隔を基本的にその機器任せとするような、測量船を用いた水路測量とは大きく異なる。例えば測量船に艀装した測深機の場合、空間的に密に発振することが水路測量上望ましい一方で、海底までの距離が最大発振レートを制約するため、通常は水深に応じた自動発振設定が採られる。AUVの場合はそのような臨機応変な設定をとることが難しいため、発振タイミングを事前に定め、かつその設定が有効に働くような条件下でのみ運用するというような厳密な管理が必要になる。

3 実例：平洋搭載型 AUV の音響発振管理

3.1 機器概要と発振シーケンス例

平成25年度から運用している測量船「拓洋」搭載型AUVに加え、最近では新たに2機のAUV「ごんどう3」及び「ごんどう4」が加わり、令和

2（2020）年に就役した測量船「平洋」に搭載された。当部では現在これら4機のAUVを運用し、深海域における精密な海底地形の取得をはじめとする各種の海底マッピングに活用している。平洋搭載の「ごんどう3」及び「ごんどう4」は、株式会社IHIによって製造された航行型AUVである。観測機器としてR2Sonic社製Sonic 2022マルチビーム音響測深機（MBES）、EdgeTech社製2205サイドスキャンソナー（SSS）を搭載するほか、海底下の構造を音響的に可視化するためのサブボトムプロファイラ（SBP）としてEdgeTech社製DW424を搭載する。また、航法に用いるドップラ式速度ログ（DVL）にはTeledyne RDI社製Workhorse Navigator 300（300 kHz）、前方障害物検知ソナー（FLS）としてImagenex社製852（675 kHz）、そして、通信のための装置としてSercel社製MATS 3G（12 kHz）、測位装置としてixblue（現exail）社製GAPS（通常20 kHz）を搭載する。これら音響機器のうち、DVL、FLS、MBES、SSS及びSBPについてはユーザが任意の発振タイミングを設定することが可能である。但し、SSSとSBPは発振トリガを共有しており同時に鳴らす以外の選択肢はない。音響通信装置及び音響測位装置については、母船からの問いかけに応じてその都度発振することを基本としており、DVLその他の発振タイミング管理とは独立している。平洋搭載型AUVが使用する音響機器とその周波数帯についての模式図をFig. 1に示す。

DVL、FLS、MBES及びSSS/SBPはいずれも、50ミリ秒単位で発振タイミングを設定可能であり、ユーザが定める一連の発振シーケンスを繰り返すように設計されている。AUVはGNSS受信機を内蔵し、GNSS信号受信時に内部搭載機器の時刻同期を行う。そして、搭載機器の統括的な制御を行う内部コンピュータがTTL回路によってトリガ信号を生成し、各音響機器へ入力することで、各機器の発振タイミングが制御される。2024年現在、実海域での運用において使用している発振シーケンスの実例をFig. 2に示す。

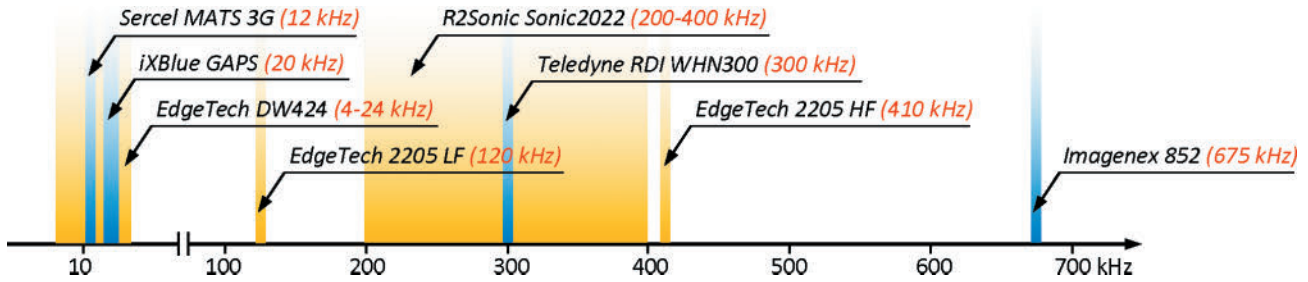


Fig. 1. Schematic of nominal frequency distribution for the acoustic instruments equipped to the AUVs onboard the S/V Heiyo.

図 1. 測量船「平洋」搭載の AUV に搭載された音響機器の発振周波数帯を示した模式図。

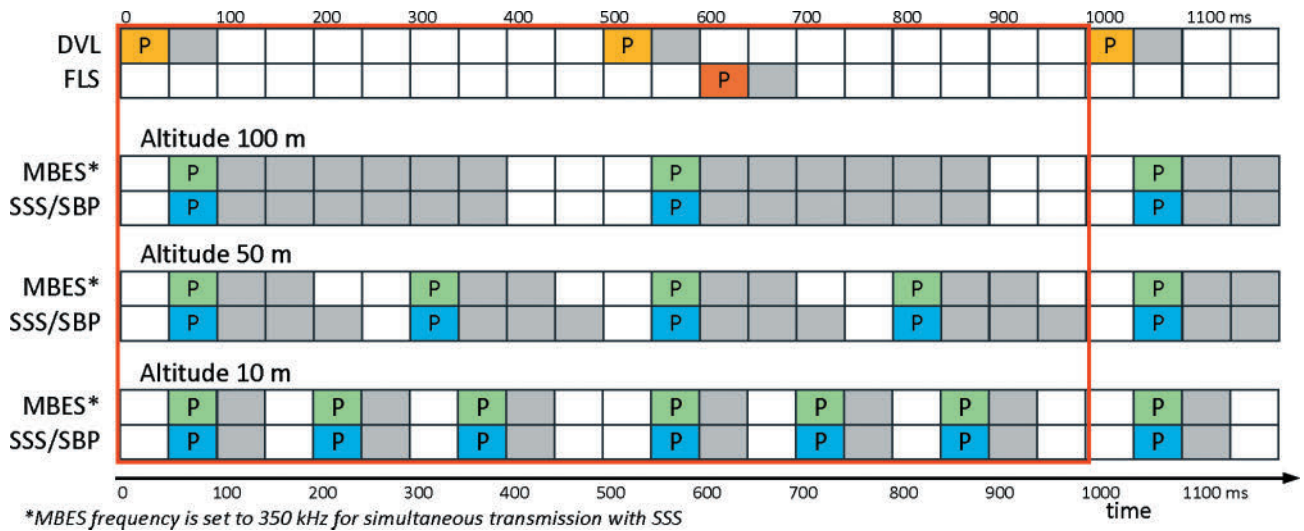


Fig. 2. Examples of ping scheduling used for the AUV *Gondou 3* and *Gondou 4* onboard the S/V Heiyo. The AUVs are designed to allow the pulse transmission timing of each acoustic instrument to be specified in time frames of 50 millisecond intervals, and are set to ping at the time indicated by “P” in the figure, depending on the altitude above the seafloor. The gray hatched time frame indicates the time when the next ping should not be set because the instruments are waiting for their echo. The schedules of the MBES (multi-beam echosounder) and SSS (side-scan sonar) transmissions are set to achieve the optimum observation density according to the operational altitude of the AUVs. The DVL (doppler velocity log) alternates between measuring vehicle speed to the ground and to the current, so that the ground speed measurements, which have a significant impact on the AUVs’ navigation along the survey line, are taken at one-second intervals.

図 2. 測量船「平洋」搭載の AUV「ごんどう 3」及び「ごんどう 4」で使用される音響機器発振シーケンスの例。当該 AUV は各音響機器の発振タイミングを 50 ミリ秒間隔の時間枠で指定可能な設計となっており、調査海域ごとに設定する測線の海底からの高度に応じて、それぞれ図中に“P”で示したタイミングで発振する設定としている。灰色の時間枠は、各機器が観測中であるために次の発振を設定すべきでないと考えられる時間を示したものである。MBES 及び SSS の発振シーケンスは AUV の運用高度に応じて最適な観測密度となるよう設定している。DVL は対地速度測定と対水速度測定を交互に繰り返す設定のため、AUV の測線航走に重要な対地速度測定は 1 秒間隔で行われる。

3.2 要求される最低発振頻度

平洋搭載型 AUV の発振シーケンスを検討するにあたり、以下の数々の条件を考慮した。

まず、DVL については、安定航行のため 1 Hz 以上で対地速度を取得することが AUV の製造元

により推奨されている。ここで、DVL は対水速度測定と対地速度測定を交互に繰り返す設定であるため、発振レートとしては 2 Hz を確保する必要がある。FLS についても、確実な障害物回避の観点から、1 Hz 以上での発振が製造元により推

奨されている。この両機器については AUV の運用環境に依らず、常に一定のレートで発振シーケンスに組み込まれている必要がある。

次に、MBES 及び SSS/SBP は、その発振レートが測線方向のデータ取得密度に影響することを考慮に入れる必要がある。平洋搭載型 AUV の測線航行時の速力はつねに 3 kt であるため、発振レートの調整のみによって、望ましい測深点密度やサイドスキャン画像の密度を作り出すことが求められる。ここで、マルチビーム測深機の運用において調査海域のすべての海底に音響ビームが当たるようにするためには、直下ビームのフットプリントが進行方向に重複するような間隔で発振させる必要がある。調査高度を h [m]、直下ビームの進行方向ビーム角を θ 、航行速力を v とすれば、ごく単純な定式化により発振頻度の下限の目安を $v/h\theta$ と見積もることができる。平洋搭載型 AUV の場合、 $v=1.5$ m/s、 $\theta=1$ deg ≈ 0.017 rad を代入して、最低発振レートはおおよそ $88/h$ Hz である。

上記の条件に加え、DVL、FLS、MBES、SSS 及び SBP のいずれの機器もエコーによる測距をその観測原理とする特性上、自己の発した信号が帰ってくるまでの間は、原則として次の発振を控える必要がある。海中の音速及び AUV の調査高度から各機器に求められる発振待機時間を見積もった例が Fig. 2 である。

なお、前述のとおり MBES の最低発振レートを $88/h$ Hz として考えれば、高度 50 m では 1.76 Hz $\approx 1000/570$ Hz となる。すなわち、MBES はおおよそ 500 ミリ秒以下の周期で発振させる必要があるが、500 ミリ秒周期の DVL 及び 1000 ミリ秒周期の FLS の発振と MBES 及び SSS の発振タイミングを重複させないようにする場合には、MBES と SSS それぞれを単独で発振させるのではなく、同時に発振させることが発振頻度の自由度を確保する上では望ましい。その際、MBES と SSS が互いに干渉を生じないよう最適な周波数設定を見出す必要があるが、平洋搭載型 AUV では広帯域 MBES のメリットを活かし、MBES 側の発振周波数を SSS に近接しないよう調節するこ

とで対応している。

3.3 発振頻度による機器相互の影響

平洋搭載型 AUV が搭載する音響機器相互の干渉回避については、AUV の通常運用に先立ち、最適な発振頻度設定を見出すべく試験を行った。例として Fig. 3 及び Fig. 4 を示す。これらは、異なる発振シーケンスを設定した際に観測データに現れる干渉の有無について確認するため、AUV をクレーンによって海面に吊下してデータ取得を行った実験結果の一部を示したものである。なお、試験を行う環境上の制約から、吊下時の水深は約 15 m である。平洋搭載型 AUV の通常の運用高度である海底上 50 m 及び 100 m での干渉の有無についての最終的な確認は、実海域での潜航調査において事後的に行っている。

Fig. 3 は SSS の収録データを可視化したものである。SSS データの収録中に他の音響機器を発振させることで現れた異常記録について、そのタイミングから推定される干渉源を図中に示している。DVL、FLS 及び MBES それぞれを発振させたタイミングで、各機器から直接 SSS の受波部に伝播したと思われるノイズが記録されている。干渉音源が存在しないタイミングではデータに問題はないものの、干渉を受けるとその音源のパルス長の分だけデータに異常が現れることがわかる。

Fig. 4 は MBES の収録データを可視化したものであり、測深機が検出した測深点群を繋いで線として表示したものである。干渉がない状況下 (Fig. 4a) では基本的に海底面はよく捉えられており、それ以外にみられる異常記録は主に、ジオメトリの影響等で特定のビームに海底面よりも強いエコーが存在したと思われるケースや、ランダムなノイズを測深点として検出したと思われるケースに限定される。また異常記録の現れる頻度にも明確な周期性はみられない。Fig. 4a のケースでは海底面から離れたレンジにおいて測深点が円弧状に並んでいる箇所があるが、このような場合であっても、直下から数十度の範囲内で海底面

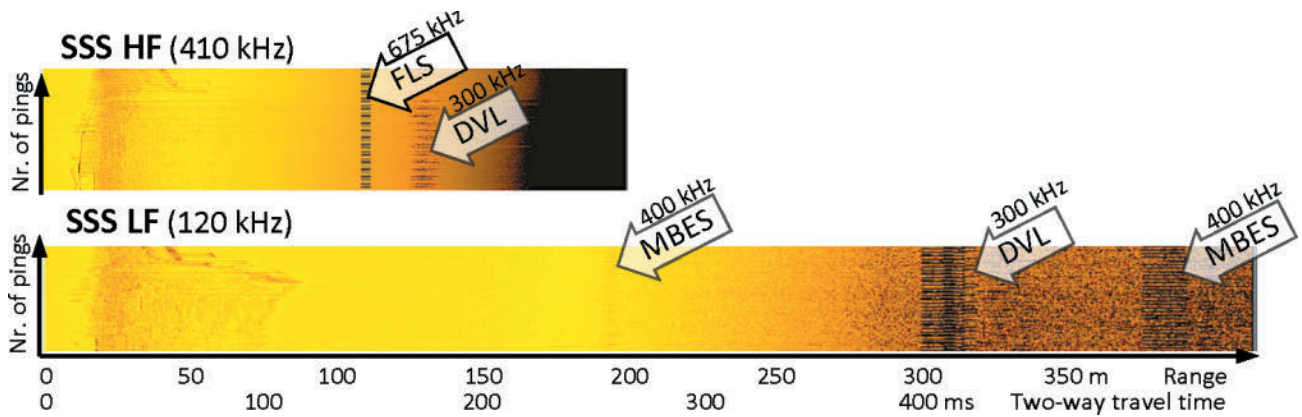


Fig. 3. Examples of SSS recording data during acoustic interferences. The horizontal axis shows the range and pulse round-trip time, the vertical axis shows the number of pings, and the color indicates the backscatter intensity. If an acoustic device equipped on the AUV interferes during SSS recording, an anomaly record appears as a line segment in the data. The interference sources assumed from the oscillation timing are indicated by arrows.

図 3. 音響的な干渉を受けている際の SSS 収録データの例。横軸はレンジ及びパルスの往復時間を、縦軸はピング数を、色は後方散乱強度を示している。SSS の収録中に AUV 搭載機器が干渉するとデータ上には線分として異常記録が現れる。発振タイミングから想定される干渉音源を矢印で示している。

が捉えられていれば解析上は大きな問題なく海底地形図を描くことができる。他方、搭載機器の発した音が干渉する場合 (Fig. 4b) には、特定のビームだけではなくスワス全体に渡って異常記録が現れるという特徴がある。異常記録はある特定レンジ上の円弧として現れ、またこのケースでは各機器の発振周期を固定しているため異常記録は周期的に現れる。特に強い音圧や近接した周波数帯をもつ干渉源の場合はこのようにすべてのビーム上で異常な測深点を生成しかねず、実運用においてそのような干渉を生じないよう、事前に最適な発振間隔を調整する必要がある。

なお、搭載された各機器固有の特性によっては、実際の発振タイミングが発振トリガに対して遅延し、結果としてユーザの意図するタイミングから僅かにずれることも考えられる。その遅延の程度が許容できるものであるか、すなわち航行に支障をきたさず、かつユーザが所望するデータ精度が確保されているかを確認する意味でも、AUV を海面に吊下しての試験は有効であると考えられる。平洋搭載型 AUV においては、吊下試験において発振シーケンスを様々に変化させた結果、上記のような遅延が仮に生じているとして

も、海域で実用する発振シーケンスは問題なく使用可能であることが確認された。その上でさらに、実際の海域において測線上を航走させ、その発振シーケンスがユーザの観点から実用上の問題を生じないことを確認している。

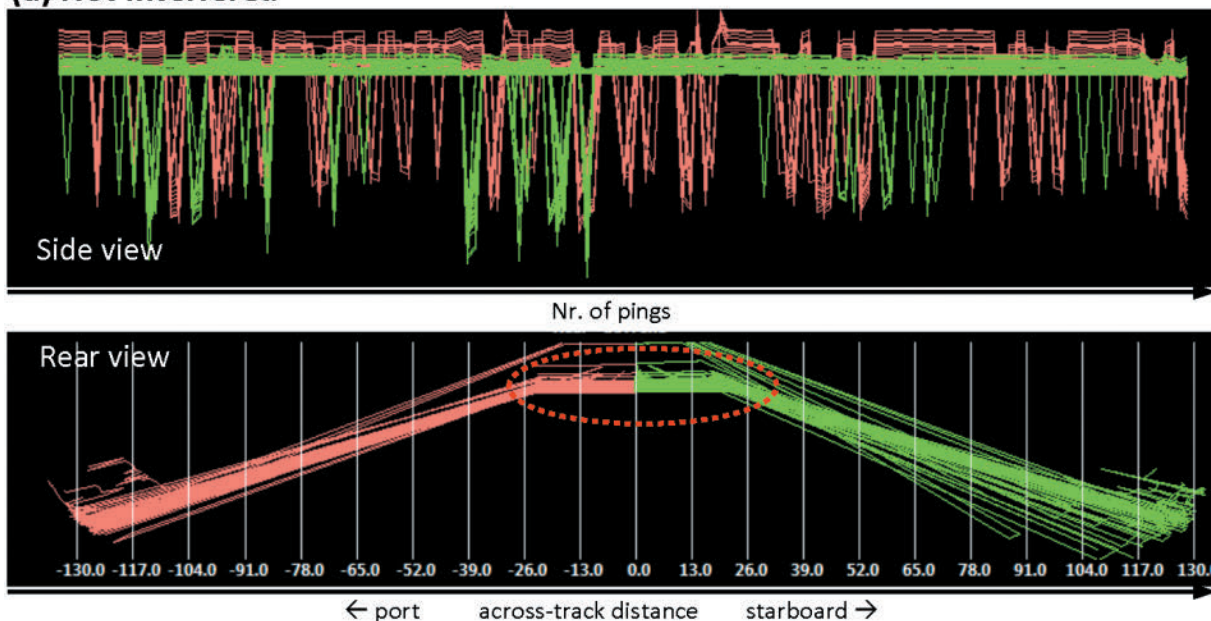
3.4 その他の音響機器による干渉

観測や航行のための音響機器に加え、通信に係る音響機器も観測データへの干渉をもたらす。音響測位装置である GAPS については経験的に他機器への干渉は見られないものの、音響通信装置 MATS (12 kHz) は強い干渉を示し、MBES, SSS 及び SBP 観測データの品質を著しく毀損する。そのため、測線中では音響通信装置の発振は行わず、AUV の状態の確認や AUV への各種指令は測線外でのみ行うという運用をしている。

4 おわりに

航行型 AUV の主目的となる海底マッピングにおいて、音響機器相互の干渉はデータの品質に関わる重要な問題である。また、AUV の航走の安定性にも影響することから、音響機器の発振タイミング管理は、観測機器のみならず AUV の構成

(a) Not Interfered



(b) Interfered

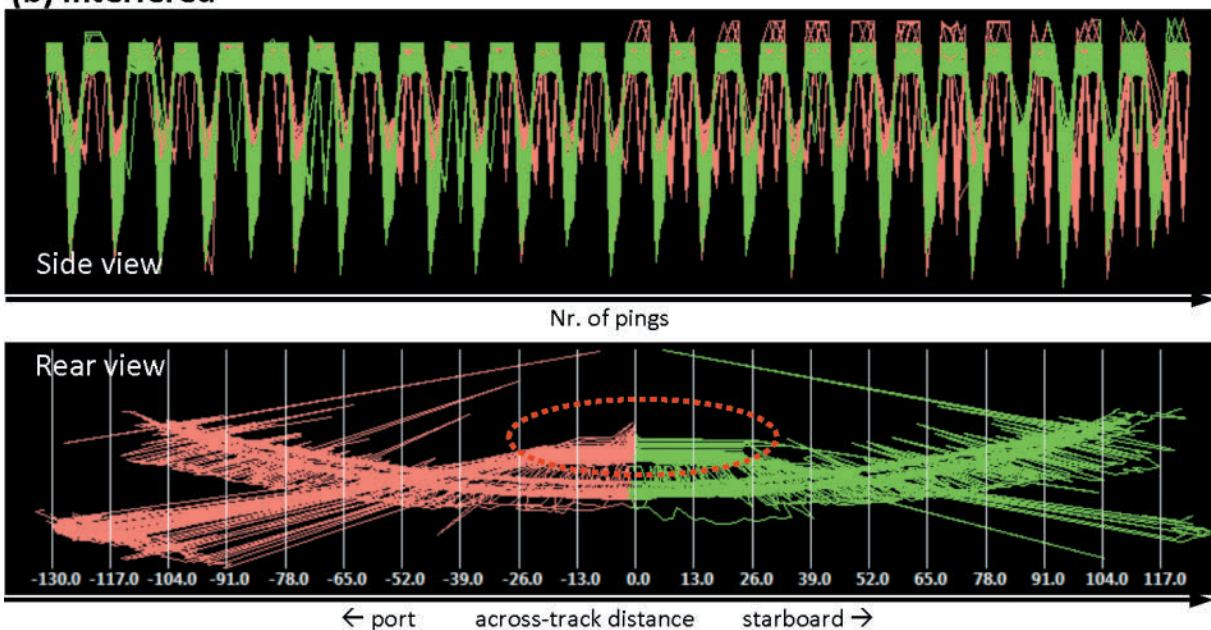


Fig. 4. Examples of MBES data without interference (a) and with interference from AUV-equipped equipment (b). The bottom detections are connected by line segments, with the port side record shown in pink and the starboard side in green. Both (a) and (b) show the data of multiple pings acquired over a certain period, with the side view shown at the top and the rear view shown at the bottom. The vertical axis indicates depth, but the axis is stretched to emphasize the anomaly record. The area circled by the red dotted line is the recorded seafloor surface. Strong acoustic interferences from the onboard equipment result in periodic arc-shaped anomaly records and the seafloor is lost from the bathymetric detections.

図 4. MBES 収録データについて、干渉を受けていない場合 (a) 及び AUV 搭載機器の干渉を受けている場合 (b) の例をそれぞれ示したもの。測深点を線分で結び、左舷側の記録をピンク色で、右舷側を緑色で示している。(a) 及び (b) はともに、ある一定の時間取得した複数ピングのデータについて、側面から見た図を上方に、後方から見た図を下方に示している。なお、縦軸は深度を示すが、異常記録を強調するために軸を伸縮している。赤の点線で囲んだ範囲が海底面を捉えた記録である。AUV 搭載機器からの強い音響干渉を受けると円弧状の異常記録が周期的に現れ、海底面の検出が困難になる。

機器全体の特性をある程度把握した上でなされるべき重要な課題である。なお、平洋搭載型 AUV で採用している発振タイミング管理 (Fig. 2) は、ある特定の航行高度に限定された発振シーケンスを潜航ごとに事前設定するというものである。このような発振タイミング管理は AUV の航走方法を海底からの高度を一定に保つ方法に限定することとなる。例えば平洋搭載型 AUV の場合、通常は海底上 50 m で運用を行うが、海底面の追従に不安のあるような起伏に富んだ地形があれば海底上 100 m での運用を検討する。運用条件と音響発振のシーケンスが結びついているため、任意の高度で運用するといった柔軟な対応は難しいが、シーケンスにいくつかの種類を用意しておくことである程度運用に幅をもたせることができる。このように、音響機器の発振設定は運用する海域や測線の設定にも影響し、AUV による海底観測のプラン全体を左右する重要なファクタである。

本稿で触れた内容は当部が運用する AUV の機体特性に依存したものであり必ずしも一般化できるものではないと思われるが、AUV を用いた海底マッピングの実施に際し、本稿が示唆を与えるものとなっていれば幸いである。

謝 辞

AUV「ごんどう 3」「ごんどう 4」の安定運用の実現にあたり多大な尽力を賜った歴代の大洋調査課 AUV 担当職員及び測量船「平洋」乗組員の皆様、製造元である株式会社 IHI の AUV 担当各位、並びに本稿の内容の改善に係る貴重なコメントをくださった査読者の方に対し、ここに記して感謝いたします。

文 献

- iXblue (2016) PHINS surface-product specification, iXblue, St-Germain-en-Laye.
- 南 宏樹 (2021) 海上保安庁の AUV 調査で明らかになった琉球弧及び沖縄トラフの火成活動及び構造運動, 海洋情報部研究報告, 57, 101-119.

長澤亮佑・田中喜年・堀之内龍一 (2023) 航行型 AUV「ごんどう」による海底光学観測のための低高度運用の定常化に向けた検討, 海洋情報部研究報告, 61, 62-74.

要 旨

航行型 AUV は、海底面の地形データや音響画像の取得といった、音響的な海底マッピングを得意とする AUV である。その運用において重要なファクタとなる音響機器の発振タイミング管理について、AUV を運用する立場から考慮すべき点をまとめる。航行の安定性や観測データの品質管理といった要件とそれに対応するための発振タイミング管理について、海上保安庁海洋情報部の測量船「平洋」に搭載された AUV の実例を交えて紹介する。