

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[†]

長澤亮佑*, 田中喜年*, 堀之内龍一*

Considerations on the low-altitude operations of the cruising-type AUV *Gondou*
for seafloor photographic surveys[†]

Ryosuke NAGASAWA*, Kitoshi TANAKA*, and Ryoichi HORINOUCI*

Abstract

The Japan Coast Guard AUV *Gondou* is a cruising-type autonomous underwater vehicle. The *Gondou* is equipped with a downward-looking camera system that potentially unveils detailed seafloor feature from a different perspective than acoustic observations. As the *Gondou* is designed to run at relatively high-speed for wide-range seafloor mapping, the vehicle has limited maneuverability in horizontal and vertical directions. These operational characteristics of the vehicle require careful considerations in the design of mission planning and predetermination of contingency avoiding behaviors. This technical report notes our operational efforts to conduct seafloor photographic surveys with the cruising-type AUV.

1 はじめに

海上保安庁は、測量船「拓洋」を母船とする自律型潜水調査機器（AUV：Autonomous Underwater Vehicle）「ごんどう」を 2013 年から運用し、海底地形・地質調査を実施している。AUV は事前にプログラムされた経路に沿って海中を航行する無人の調査機器である。海底近傍までの潜航及び海底からの高度を一定に保ちながらの航行が可能であることから、海底の深度に依存しない高い空間分解能での海底観測が実現される。この利点を活かし、「ごんどう」は水深 1,000–2,000 m の深海域において微細な海底火山地形や熱水・ガスといった火成活動の兆候を音響的に観測することに成功し、琉球弧及び沖縄トラフにおいては火成活

動及び構造運動の解明に資するデータを数多く収集してきた（南，2021）。2018 年には、「ごんどう」の観測機器として新たに海底写真撮影用のデジタルカメラが追加された（長澤・他，2019）。これにより、局所的な底質や人工物、底生生物の状況が視覚的情報としてもたらされることとなり、音響観測とは異なる新たな視座をもって海底の把握を行うことが可能となった。

一方、光学観測には、音響観測よりもシビアな運用条件が要求される。水中における可視光の伝搬損失は顕著であり、観測対象を鮮明に捉えるには機体を海底に接近させる必要がある。「ごんどう」で光学観測を行う場合、海底上 10 m から撮られた画像であっても被写体の判別は容易ではな

[†] Received August 19, 2022; Accepted October 5, 2022

* 大洋調査課 Offshore Surveys Division

い（長澤・他，2019）．音響測深機を用いた地形観測であれば海底上 50 m 程度の調査高度でも高い空間分解能（機体直下の音響ビームのフットプリントサイズにして約 1 m）を得られる一方，光学観測ではさらなる海底への接近が求められ，障害物への予期せぬ接触などの潜在的なリスクが高まる．そのため，運用においては事前に特別な考慮が必要となる．

AUV の機体の仕様も海底光学観測の難易度に大きく影響する．「ごんどう」は一定速力での高速航行（およそ 1.5 m/s）を得意とする航行型の AUV である．広範囲の効率的なマッピングが可能であるという大きなメリットを有する一方で，ホバリング型 AUV（Newman et al., 2008 など）に比べて，左右方向や鉛直方向への機動性には制約があり，機敏で繊細な水中移動を期待することはできない．AUV の海中での調査計画（ミッションプラン）をプログラムする段階においては，こうした機体特性への留意が必要である．

本稿は，航行型 AUV である「ごんどう」の特性を踏まえ，光学観測を定常的に行う上で必要と考えられる運用上の要点についてまとめる．光学マッピングの初期試験結果を報告した長澤・他（2019）の時点では，測線の設計や観測機器のパラメータ設定に暫定的な要素を多く伴っていた．本稿では運用面での改善の検討をさらに進めた結果として，ミッションプランの作成や各種緊急回避項目の設定に係る留意点を示すとともに，実海域において再度試行した光学観測の結果を紹介する．

2 AUV「ごんどう」の特性

AUV「ごんどう」は，カナダ・ISE 製の Explorer 型 AUV であり，機体の全長は 4.8 m，空中重量は 810 kg，水中での通常速力は 1.5 m/s（約 3 kt）である．全般的な運用方法については栗田・他（2014）を，AUV の危機回避特性及びそれを踏まえた運用初期における改善の履歴については栗田・他（2015）をそれぞれ参照されたい．

2.1 航法

航法機器として慣性航法装置（INS：Inertial Navigation System）iXblue PHINS 及びドップラ速度ログ（DVL：Doppler Velocity Log）Teledyne RDI Workhorse Navigator 300 kHz を内蔵する．DVL は機体直下を向くように据え付けられており，海底に向けて発射された複数の音響ビームのドップラシフトにより対地移動速度を推定する．AUV は，DVL を対地移動速度及び海底からの高度に関する情報源として用いており，INS との組み合わせによって高精度の自機位置推定を行っている．機器製造元の公称する仕様によれば，INS/DVL 航法による位置推定誤差は航行した距離の約 0.1%（iXblue, 2016）である．DVL が海底を検知する最大高度は約 200 m とされている（Teledyne RD Instruments, 2009）．DVL による海底検知の成否は音響ビームの指向角にも依存するが，機体が水平に近い状態であれば，経験上，高度 150–200 m 以下で概ね安定して機能する．「ごんどう」は GNSS 受信機も備えており，海面航行時には主にディファレンシャル測位による自機位置の把握が可能である．深度の推定には圧力センサ Paroscientific 8CB4000-I が用いられ，圧力値が深度値へと変換されることで鉛直方向の座標値を得ている．

2.2 障害物検知

水中での危険回避のため，自機周囲の障害物を検知できる 2 種類のシングルビームソナーを備える．前方監視ソナー（OAS：Obstacle Avoidance Sonar, Imagenex 852, 675 kHz）は機体前方に設置され，幅 9° のビームにより機体の進行方向を監視している．海底監視ソナー（BAS：Bottom Avoidance Sonar, Kongsberg Mesotech 1007D, 675 kHz）は機体前方の下部に設置され，幅 2.5° のビームにより進行方向の下方 45° 方向を監視している．

2.3 絶対位置推定

水中での絶対位置の推定には USBL 方式の音

響測位装置 iXblue GAPS を使用している。INS/DVL による推定結果が USBL 測位結果と著しく異なっている場合、位置ずれ量の東西成分をオペレータがコマンド送信することにより、AUV の自機位置推定を修正することができる（ポジションアップデート）。この操作は特に大深度域や海流の速い海域においては重要である。潜航中に DVL の海底検知が行われない時間が継続すれば位置推定は INS 単体で行われることとなり、その場合には 0.6 NM/hour 程度の割合で誤差の蓄積が進行する（iXblue, 2016）。一例として、沖縄トラフの黒潮流軸付近（表層流速 1–2 kt 程度）では、水深 1,500–2,000 m の海底に到達するまでの間に 200–400 m 程度の水平位置推定誤差が生じることも珍しくない。そのためポジションアップデートは予定された測線上を航行させるための不可欠な操作である。但し、「拓洋」では USBL 機器に浮体式の治具を用いているため音響測位の品質は必ずしも高くなく（南, 2021）、ポジションアップデート後も 10 m オーダ以上の誤差は残るのが実情である。

3 光学観測の要件

3.1 調査高度

光学機器の性能を最大限活用したとしても、太陽光の届かない深海底において被写体が判別可能な海底画像を取得するためには、調査時の高度を低く保つことが最重要となる。高度を下げすぎずに露光時間を長くすることも選択し得るが、一定速力での航行を前提とした航行型 AUV の運用特性上、撮影した像が流れる懸念からその選択は望ましくない。長澤・他（2019）の試験潜航においては、測線航走時の AUV の制御は高度一定又は深度一定とし、高度一定時には海底上 10 m を保つように設定していた。この結果、被写体の種類にもよるが高度 9–10 m では光量が不足するケースが多く見られた。「ごんどう」と同機種の撮像システムを用いた浅野・他（2022）では調査高度を 8 m 一定として有効なオルソモザイクを描いている。効率的なモザイク作成のためにはできる

限り高い高度からの調査にメリットがあるため、8 m 程度が品質と効率性を兼ね備えた現実的な設定であると推測される。

3.2 測線間隔

INS/DVL 航法による位置推定誤差の蓄積、及びモザイクを容易にすることを考えて、隣接する測線間で海底画像に十分なオーバーラップを生じさせる必要がある。浅野・他（2022）では測線横断方向の重複率の目安を 60% 以上としている。測線横断方向の視野範囲は高度の約 90%（長澤・他, 2019）であることから、重複率 60% を達成するためには、高度 8 m の場合、測線間隔は概ね 3 m とする必要がある。

3.3 測線範囲

航法に由来した位置推定誤差のほか、ポジションアップデート精度の限界に起因する系統的な位置推定誤差が存在する。観測できる視野の範囲がきわめて狭い海底光学観測においてこの誤差は無視できず、仮に INS/DVL 航法による自機位置推定の誤差蓄積を抑制できたとしても、数十 cm レベルでの高精度なポジションアップデートが実現しない限り、実際に AUV が航走する経路は予定測線から少なくとも 1 m オーダの平行移動を伴った線となる。そこでミッションプランにおいては、系統的な位置誤差を加味して測線を設計する必要が生じる。マッピングが必要な区域をカバーし、かつ区域外にも多少の余裕をもって AUV を航走させるような計画が求められる。

4 低高度運用における要点

海底光学観測が可能な航行型 AUV の実例として、英国・国立海洋学センター（National Oceanographic Centre）の *Autosub6000* が存在する。同機は全長 5.5 m で「ごんどう」よりも大型の機体を持ち、前方ソナーを鉛直方向にスキャンすることによる広い監視範囲の実現と、それに合わせた障害物回避アルゴリズムの開発により、実海域において目標高度 3 m での航走を行って

いる (McPhail et al., 2010). 「ごんどう」は前方監視機能が OAS と BAS の 2 種類に限られるため同等の能力を有しているとはいえないが、障害物接触リスクの回避のために機器特性を踏まえたミッションプランの作成や運用上の工夫の余地は存在する。「ごんどう」の低高度運用の実現にあたり検討した各種事項を本章に示す。

4.1 測線・ウェイポイント設計

4.1.1 降下地点の事前調査

AUV が海底近傍まで降下する際には、海底への接触を起こさないよう、降下地点に顕著な起伏や障害物となる物体が存在しないことを予め確認する必要がある。そのため、過去に測量船や AUV で取得された海底地形及び海底の散乱強度データを参照し、海底面の詳細な形状と推定される底質をできる限り事前に把握することが求められる。不測の事態に備え、低高度への降下を予定している地点の周辺以外にも上記のような低高度への降下に不適当な箇所があれば、その範囲を事前に特定しておくことは重要である。

4.1.2 段階的な降下

音響観測時には、AUV を海面付近から調査高度付近 (海底上 50–100 m) まで一度に降下させ、その後にポジションアップデートを行っている。これは DVL が海底を検知しない時間を短く抑える上でも望ましいと考えられる。一方、光学観測時には海底への接近を伴うため (海底上 10 m 以下)、ポジションアップデートが行われないまま降下させるのは危険である。そこで、高度 50–100 m 程度で一度降下をやめ、DVL による海底検知を確実に機能させてからポジションアップデートを行い、その後に低高度へ向かうという段階的な降下の設定が必要である。

4.1.3 入出線判定範囲の設定

「ごんどう」は、予定された測線への入出線を自機の経緯度情報に基づいて判定している。Fig. 1 に示すように、ウェイポイントの周囲にはユー

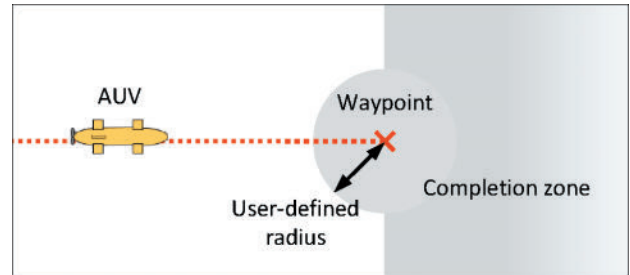


Fig. 1. Schematic image of termination condition of the AUV Gondou line-following behavior. The dotted line indicates survey line. The grey hatched area represents the zone in which the vehicle completes its following of a planned survey line (red-dotted).

図 1. AUV「ごんどう」の測線航走に関する概念図。破線は航走中の測線を示し、AUV が網掛け範囲に到達した時点で出線と判定される。

ザが予め指定した半径分の判定範囲が存在し、この内部に入ることによって当該ウェイポイントへの到達が判定される。光学観測では測線間隔が狭く、また隣接測線間の航法誤差蓄積を抑えるために隣接測線を順番に航走する必要があるため (長澤・他, 2019)、AUV は測線終端において急旋回を強いられる。「ごんどう」はウェイポイントへの到達を判定するとその判定地点と次のウェイポイントとを結んだ直線上を航走しようとするため、測線の延長線上から逸れた地点でウェイポイント到達が判定された場合には、実際の航跡と計画された測線とが平行でなくなり、画像の重複を利用したモザイクングに支障をきたす。この影響を軽減するためには、ウェイポイント到達範囲を定めるパラメータである半径の設定値を極力小さくする必要がある。

4.1.4 安全なトランジット経路の設定

1 回の潜航で複数の測線群を航走する場合、測線以外で低高度の航走を行う必要がなければ、測線群の間のトランジット時には高めの航走高度を設定することが望ましい。「ごんどう」においては、測線群への到達前の地点にウェイポイントを設定し、そのウェイポイント前後での航走高度を別々に設定することが可能である。また、ウェイ

ポイントを適切に配置し、追従が困難な海底の起伏を避けてより安全に航走させることも重要である。

4.1.5 DVLの海底検知性能の考慮

DVLによる海底検知の安定性は、海底からの高度や機体の姿勢角に依存する。そのため、AUVの測線及びウェイトポイントの設計にあたっては、可能な限り起伏を避け、また高度変化が大きくなならないような航跡をたどるようにすることが望まれる。経験的には、海底面に対する傾斜は 20° 程度以内に抑えることが望ましいほか、短時間でアップダウンを繰り返すような地形も避けたほうがよい。AUVの鉛直方向の制御を高度一定ではなく深度一定とすることもできるが、その際には海底の起伏に伴う高度変化でDVLの海底検知が外れることのないようにする必要がある。

4.2 機器設定

4.2.1 ピッチ角の制限

「ごんどう」の水中での挙動にはある程度の制限範囲を設けることができる。特にピッチ動作は、航行型AUVが深度を変えるのに不可欠な動作である反面、周囲の異常物への接触リスクを高めると考えられるため制限範囲の考慮が必要である。姿勢角を制限することはまた、DVLやOAS、BASの音響ビームのジオメトリを安定させることで、海底や障害物の検知を確実にするという意味でも効果があると考えられる。音響観測時には、高速での潜航及び浮上、又は起伏のある海底面への素早い追従が求められるためにピッチ角の範囲を伏角・仰角ともに最大 45° としている。後述する光学観測の試験潜航では、DVL検知不良の回避及び前方に障害物を検知した際の上方への素早い回避を実現するため、暫定的に、伏角のみを 15° 以内に抑えるような設定とした。

4.2.2 DVL/BAS 検知距離の設定

DVLによる高度計測及びBASによる障害物検知には、調査環境に応じて予め閾値を設定するこ

とができる。計測値が閾値を下回ると、後述する“fault”の状態となり、AUVは既定の回避行動をとる。BASの場合、閾値を下回る障害物を検知するとAUVはスラスタを止め、自機の浮力によって安全な高度まで上昇すると元の航走状態へ復帰する。光学観測で低高度の航走を企図する場合には、障害物への接近が許容される最小限の距離を適切に見積もり、高度下限値及びBAS検知距離の設定値として反映させる必要がある。

4.2.3 音響ブロードキャスト発振の使用

水中に潜航した「ごんどう」の状態把握には音響信号が用いられる。通信機器にはSercel MATS 3G 12 kHzを使用しており、母船側からのリクエスト信号を受け取るとAUV側のトランスデューサが発振し自機の推定位置や姿勢角、速力、内部機器の異常の有無を含む最低限の情報を送信する。AUV側から自発的に一定間隔で送信を行う設定とすることもでき、この機能は「ごんどう」のシステム上ではブロードキャストと呼称する。音響信号はAUVの測深機、サイドスキャンソナー、サブボトムプロファイラの取得データにノイズをもたらすため、通常の測線航走中にはブロードキャスト発振は行わない設定としている。他方、光学観測では低高度運用に伴う潜在的なリスクを考慮し、音響観測機器を併用しない限りにおいては、ブロードキャスト発振を常時行うことが望ましいと考えられる。

4.2.4 フォルトレスポンスの精査

「ごんどう」では、自機が直面する可能性がある様々な障害(fault)への応答を事前に規定することができる。具体的には内蔵電池の残量不足や一定時間以上の通信途絶、海底への過度な接近をはじめとする各種状況が想定されており、それぞれのfaultに対して規定された応答方法をフォルトレスポンス(fault response)と呼称する。AUVの自律的な危険回避を実現する重要な機能であるが、場合によっては過剰な応答が正常な運用の妨げとなることもある。そのため、安全性を

損なわないように配慮しつつも、運用の実態に即したフォルトレスポンスの更新が求められる。光学観測に関連する fault としては、高度が下限値を下回った際に発報する“Low Altitude”が挙げられる。通常、当該 fault への応答にはスラストの停止及び音響ブロードキャストの開始が規定されている。「ごんどう」の機体は正の浮力をもち、海中でスラストが停止すると通常 15 m/min 程度の速さで上昇する。このフォルトレスポンスについて設定の更新を要するものではないと考えるが、この例に限らず特殊な水中航走を行う場合には、調査の特性を考慮してフォルトレスポンスの適宜精査を行うことが求められる。

4.3 運用体制

4.3.1 海面の安全性の確認

光学観測に限らず、AUV が海中にある間は、常にその直上付近の海面がクリアであることを確認しておく必要がある。「ごんどう」は正の浮力を持ち、海中での危険回避行動に起因して予期せぬ海面浮上が発生する可能性がある。そのため、船舶交通その他の観点から問題が生じにくい海域を潜航場所として予め選定した上で、潜航中には USBL 音響測位との併用により AUV の水中での航行位置をその想定される誤差量とともに常に算出することは重要である。母船が AUV の直上を航走しないよう、潜航体の位置情報は母船の操船者へもリアルタイムで共有されることが求められる。

4.3.2 AUV 運用の諸要素に関する認識の共有

4.1 節及び 4.2 節の諸要素について適切に考慮を行った上で、AUV 運用チーム内で適切にその重要性の認識が共有されている必要がある。日々実施するミッションプラン作成等の作業についてはチェックリストを作成して手順を明確にし、手順に変更の必要があれば随時確実に更新することが求められる。また、AUV オペレータ側と母船の操船者側との意思疎通は常に密にすることが重要であり、AUV 投入回収作業の要領や潜航調査

中の各種事案への対応方法について適切な情報共有を要する。とりわけ海上保安庁においては、作業担当者の定期的な異動の可能性があるという組織の特性上、各種説明資料やチェックリスト類の確実な整備は、調査機器の安定運用のために不可欠な要素となる。

5 AUV 光学観測の試行結果

5.1 調査計画の概要

2018 年 10 月 29 日に AUV「ごんどう 2」を使用し、静岡県伊東市沖の海底火山である手石海丘付近において試験的に海底光学観測を実施した。測線の配置を Fig. 2 に示す。調査海域は火口の北側に位置し、周囲は水深約 90–105 m の緩やかな傾斜地である。長さ 300 m の測線を 3 m 間隔で東側に 10 本、西側に 21 本、南側に 11 本配し、東→西→南の順で芝刈り状に折り返し航走するプランとした。西側測線群は北東に向かって単調に深度を増す経路であるが、傾斜は測線の両端で 4 m 程度（平均斜度約 0.8°）ときわめて緩やかである。東側及び南側の測線群は西側に比べやや傾斜が大きく、また測線中に起伏を伴う経路となっている。東側測線群では、測線の両端の深度差は 9 m 程度（平均斜度約 1.7°）である。海底面の音響散乱強度（Fig. 2 下図）にはやや高い箇所が点在しており、火成岩等の存在が想定されるものの、測線の大部分においては特段の異常物等が存在する示唆はなく、海底は比較的滑らかであると想定された。測線航走時の AUV の目標高度は 7 m、トランジット時の目標高度は 15 m と定めた。また、測線の入出線に係る判定範囲の半径は、AUV 製造元である ISE 社の助言に基づき、0 m に設定した。

ミッションプランでは、AUV は海面からの潜航後、高度 50 m を保持した状態で Fig. 2 に示した Descent ポイントへ移動する。ここでピッチ角の下限が -15° に制限され、その場で円旋回を行いながら高度 15 m までの降下を行う。高度 15 m に達すると東側測線群へ向かいながら高度を 7 m まで下げ、東側測線群に北東端から入域する。

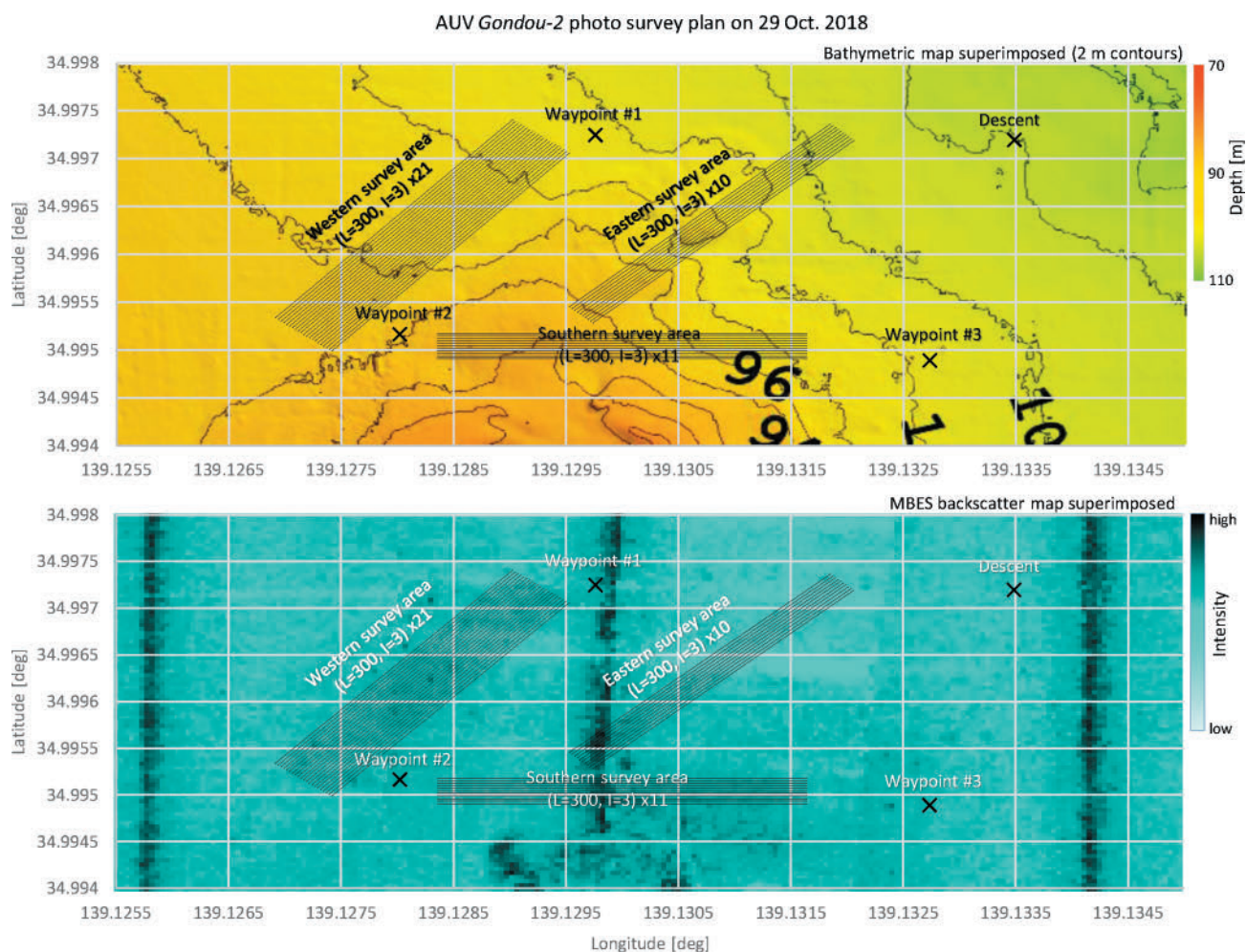


Fig. 2. AUV survey plan superimposed on ship-based MBES bathymetry (upper) and backscatter intensity (lower). The crosses indicate waypoints where the AUV is planned to make a specific maneuver. The solid lines are survey lines. Each survey line is 300 m long and aligned in 3 m interval. Note that the N-S trending linear strips with high backscatters are artifacts due to the strong reflection from the nadir and not the actual seafloor characteristics.

図 2. AUV による光学観測の調査計画図。上図には測量船のマルチビーム音響測深機を用いた先行調査によって得られた海底地形図を、下図にはその先行調査において得られた海底面の後方散乱強度図をそれぞれ重畳している。後方散乱強度図にみられる縦縞は直下からの強反射によるものであり実際の底質を反映したものではない。

東側測線群を出域した後は、すぐに高度を 15 m に上げながら西側へ向けてトランジット航走をし、Waypoint #1 を経由した後に高度を 7 m まで下げて西側測線群に北東端から入域する。西側測線群の南西端を出線後には高度を 15 m に上げて東進し Waypoint #2 へ向かい、そのまま高度を 7 m まで下げて南側測線群に入域する。出域後は高度 50 m まで上昇しながら Waypoint #3 へ向かい、その場で待機して浮上に備える。AUV の許容最小高度は 5 m、BAS 閾値は 6 m とした。デ

ジタルカメラの設定は長澤・他 (2019) と同様、レンズの開口を F1.4 で固定とし、露光時間は 1 ms を基本としたオート設定、撮影頻度は 1.5 shots/s で一定とした。

5.2 測線航走結果

この試験潜航における AUV の航跡を Fig. 3 に、各種時系列データを Fig. 4 に示す。AUV は時刻 0 時 55 分 (UTC) に潜航を開始し、3 時 14 分に海面へ浮上した。この間、DVL による海底検知は

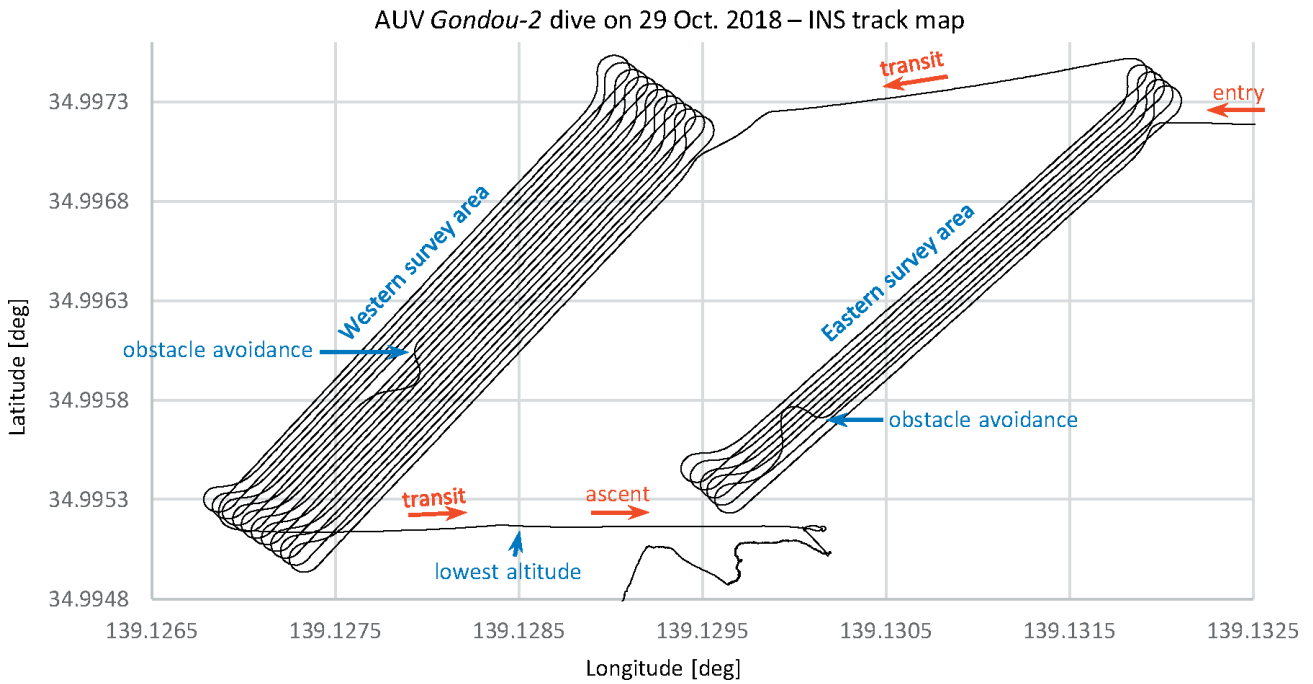


Fig. 3. AUV paths of the photographic survey on 29 Oct. 2018. Note that the positions were estimated from INS/DVL navigation. Obstacle avoidances due to the OAS detection occurred twice, both while traveling southwestward.
 図3. 2018年10月29日のAUV潜航調査における航跡。INS/DVL航法に基づく推定位置を示したものであることに留意。OASが障害物を感知したことによる避航が2度発生している。いずれも南西向き測線の航走中であった。

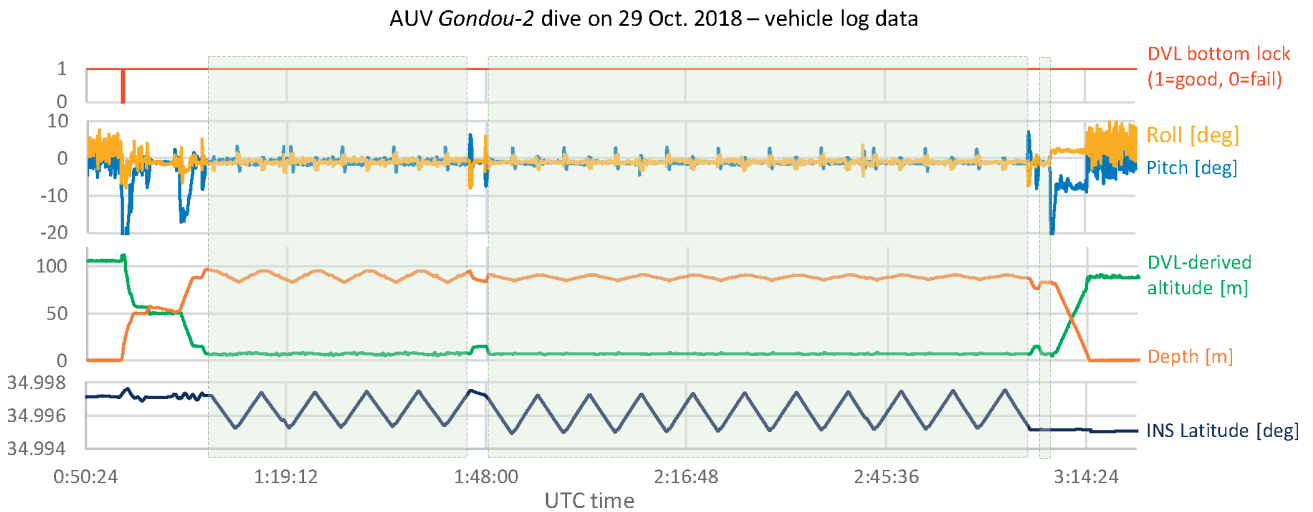


Fig. 4. Time series plot of selected parameters from the vehicle log, showing from the start to the end of the dive. The hatched sections indicate the time ranges when the AUV was following the survey lines.
 図4. AUVログに基づく諸パラメータの時系列プロット。潜航の開始から海面への浮上までを示しており、網掛け範囲は測線群の航走中を表す。

降下時に約10秒間欠測となった以外は有効であった。なお、この欠測はピッチ角が過大（概ね -33° 以下）となった時間帯と対応していた。USBL測位で補正が可能なほどの水平位置誤差を

認めなかったことからポジションアップデートは行わず、AUVは高度50m及び高度15mへの段階的な降下を行い、東側測線群に入域した。その後、西側測線群の出域までは特段の異常なく航走

したが、Waypoint #2 を過ぎて南側測線群に入域した直後、機体高度が5 mを下回り、“Low Altitude”のfaultを発報した。規定のフォルトレスポンスによりスラスタが停止し、そのまま自機の浮力により海面まで上昇した。

Fig. 3 に示す航跡によれば、測線航走中にOASによる避航が2箇所が発生したことを除けば、AUVは不必要な水平旋回を行うことなくウェイポイントを滑らかに繋いだ経路を航走し、測線についてもほぼ平行に航走したことがわかる。低高度航走中のAUVの各種時系列データをFig. 5に示す。測線からの水平誤差を示すoffline distanceは概ね1 m以内であり、かつ測線航走中には過剰な水平蛇行動もみられず、測線と概ね平行に安定した航走を行ったことが認められた。高度方向には、海底地形に傾斜の大きい東側測線群でより大きな偏差が見られた。目標高度値である7 mを中心に、西側測線群では ± 50 cm程度に収まっていたのに対し、東側測線群では ± 1 m程度のばらつきを伴った。また、測線の方向に依存して航行高度に系統的な差が見られ、南向き航走、つまり斜面に沿って上昇する向きでは反対向

き航走時と比べ高度がやや低下する傾向が見られた。東側測線群では、南向き測線の航走時の高度低下は著しく、瞬間的な高度値の増減により高度下限値である5 mへの接近も複数回発生していた。

全ての測線上で観測機器は正常に作動し、デジタルカメラでの海底撮影により東側測線群で3,338点、西側測線群で7,008点、南側測線群ではfaultを発するまでの間に121点の画像を取得した。Fig. 6には、取得画像のExif情報（画像データに埋め込まれた、撮影日時や撮影時の機器設定等のメタ情報）から抽出した撮影時の高度及び姿勢角の分布を示している。高度により分類したヒストグラムは東西の測線群で共にバイモーダルとなっており、Fig. 5 でみられた測線の航走方向に依存した高度差と調和的であった。ピッチ角と高度値、ロール角と高度値には明確な関係性は見出せないが、東側測線群では相関の可能性が疑わしい線形の分布が見られた。

5.3 Low Altitude 発報前後の状況

南側測線群でのfault発生前後におけるAUV深

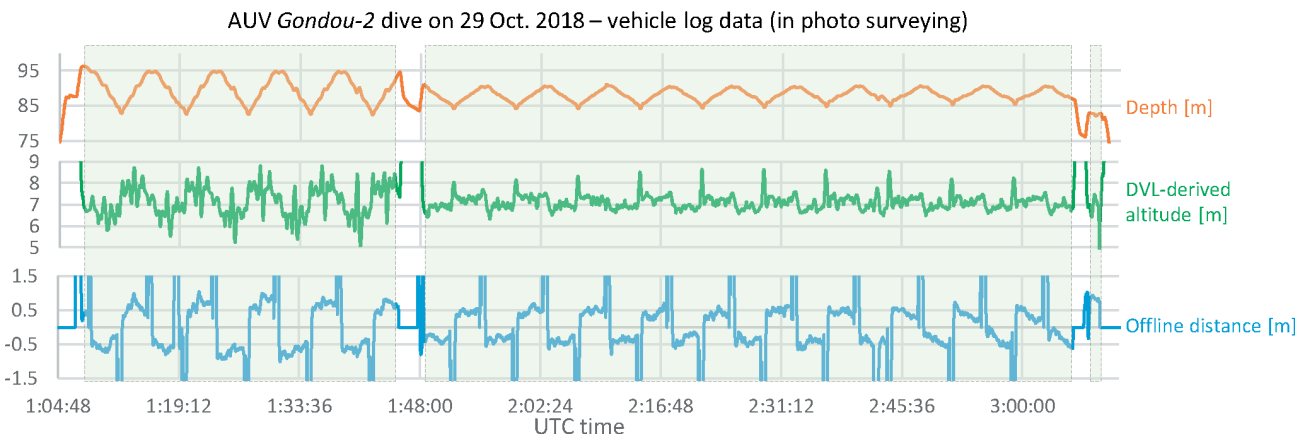


Fig. 5. Time series plot of depth, altitude and offline distance, trimmed in time to highlight the vehicle’s behavior cruising in low altitudes. The vehicle was following the survey lines in the hatched time ranges. Offline distance represents the shortest horizontal distance between the vehicle and the survey line. The positive distance means the line is on the port side of the vehicle. Points where the offline distance exceeds ± 1 m correspond to transits to the next lines.

図5. 低高度航行時における諸パラメータの時系列プロット。網掛け範囲は測線群の航走中をあらわす。図中のOffline distanceはその時点におけるAUVの位置と航走中の測線との最短水平距離を意味し、測線がAUVの左舷側にある場合に正の値となる。offline distanceが ± 1 mを超えている箇所は次の測線への方向転換と対応する。

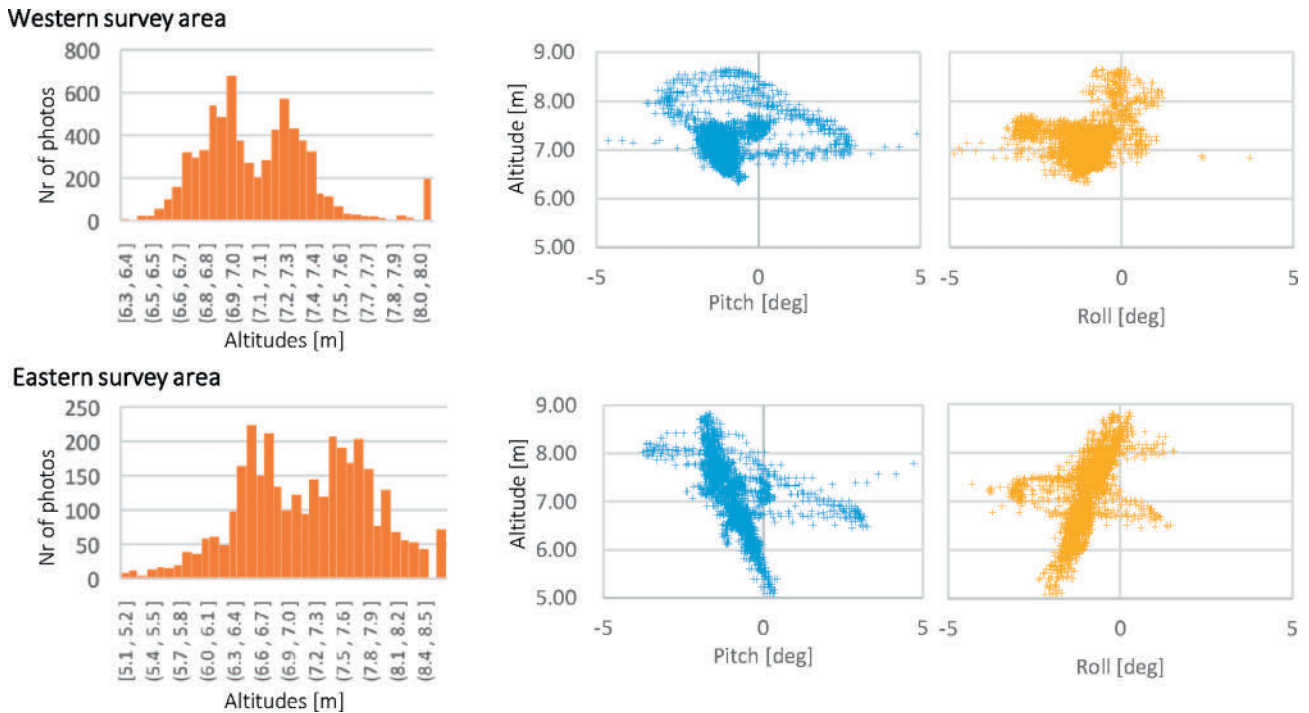


Fig. 6. Histogram of the obtained photographs showing the different range of the vehicle altitude at the time of shooting and the distribution of the vehicle altitudes versus pitch and roll angles retrieved from Exif information of the photographs.

図 6. AUV が取得した画像を撮影時の機体高度別を示したヒストグラム，並びに画像の Exif 情報から取得したピッチ角及びロール角に対する機体高度の分布。

度及び高度を含む各種データ，並びに撮影された画像を Fig. 7 に示す. AUV ログから取得した BAS 計測値に基づく高度参考値によれば，DVL 由来の高度値に先立って 5 m を下回る値を示しており，DVL 由来の高度値には BAS の高度参考値と比べ数秒の遅延が認められた. DVL 由来の高度値にして 5.36 m の時点 (t_3) では，取得画像に巨礫状の異常物や魚群が認められた. t_3 の後に AUV のピッチ角はわずかに上昇したが，DVL 由来の高度値は減少を続け，約 4 秒後には最低値の 4.73 m となった (t_4 時点). t_2 及び t_4 の取得画像には t_3 でみられたような明確な異常物は認められず，また BAS 由来の高度参考値も t_3 の前後で滑らかに下降・上昇していた. このことから， t_3 に確認された巨礫状の異常物以外に顕著な障害物が存在したと考えることは難しく，この異常物が fault の原因となったことが推察される.

また，fault 発生後は AUV のスラスタが停止し，徐々に前進速度を低下させながら海面に浮上した

が，その際にはピッチ角が負となったことがログにより確認でき，機首が下がった状態で海面まで達したことが推察された.

6 考察及び今後の検討事項

試験潜航の結果，航行型 AUV 「ごんどう」は，緩やかな傾斜地において 7 m 程度の低高度を維持したまま，海底地形をある程度追従しながらの測線航走が可能であることが確かめられた. 第 4 章に示した各種の検討を経て，3 m という狭い間隔の測線群について，水平誤差の少ない平行な測線航走による稠密かつ広範囲の海底光学観測の可能性が見出された. 本章では，前章の結果を踏まえ，今後の改善のためにさらなる検討を要する事項についてまとめる.

6.1 ピッチ角の制限に関する事項

本試験海域の水深は最大でも 100 m 程度であり，DVL の有効検知範囲内であった. 実際に，

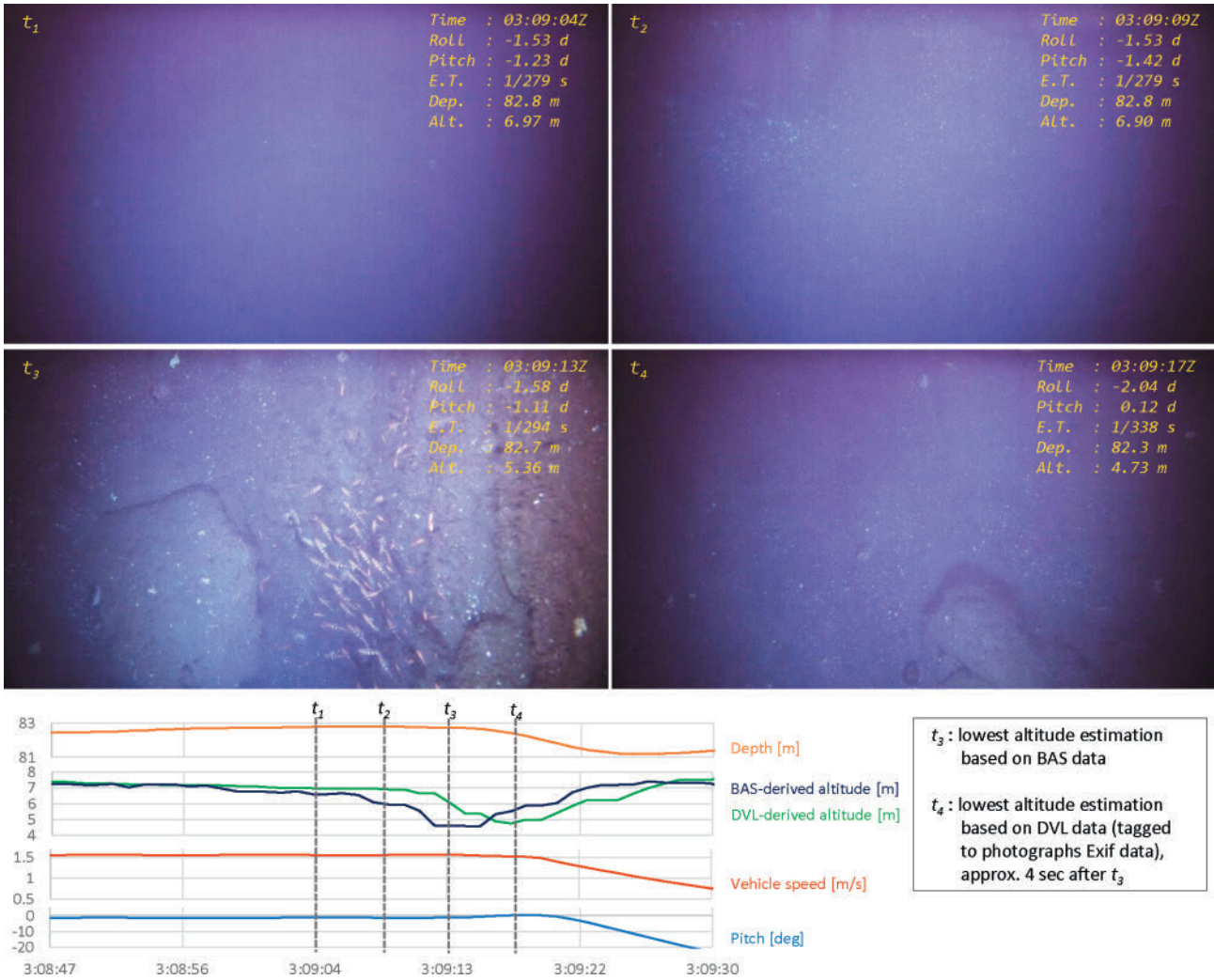


Fig. 7. Unprocessed seafloor photographs obtained by the AUV and time series plot of parameters retrieved from the vehicle log around when the AUV's Fault "Low Altitude" was occurring; the recording times of photographs correspond to t_1 , t_2 , t_3 and t_4 shown in the plot. The vehicle's direction of movement corresponds with the top-side of images. Information on the images includes time of recording (UTC), pitch, roll, exposure time (abbreviated as E.T.), depth, and altitude estimated from DVL data. The field of view of each image is approximately 90% of altitude in across-track direction and 50% of altitude in along-track direction.

図7. AUVにより取得された未処理画像及びログから取得した諸パラメータの時系列プロット。Fault "Low Altitude" 発生前後のデータを示しており、各画像の取得時刻は時系列プロット上の時刻 t_1 , t_2 , t_3 及び t_4 と対応している。各画像の上方向はAUVの進行方向と一致している。取得画像には撮影時の時刻 (UTC)、ピッチ、ロール、露光時間 (E.T.と略記)、深度及びDVLデータに基づいて推定された高度を表示している。画像の視野角はいずれも、測線横断方向に高度の約90%、測線方向に高度の約50%である。

AUVの海面投入時 (深度0 m) において既にDVL計測が有効であったことがFig. 4からも読み取れる。ところが、前章で述べたとおり、AUVのピッチ角が約 30° を超えるような状況では、DVLによる海底検知が失敗することが確かめられた。今後、本海域のような比較的浅い海域においては、位置推定誤差の蓄積の回避のため、

海面からの潜航時にもピッチ角の制限を課すなどDVL検知の有効性を保つための工夫が必要であると考えられる。

6.2 DVL/BAS 検知距離の設定に関する事項

高度一定制御での測線航走中、AUVの上昇・下降等の挙動に依存して高度値に偏りを生じるこ

とが示唆された。また、前章で述べたとおり、突発的な海底異常物に対しては、DVL由来の高度値への反映がBAS計測に比べやや遅延を伴うことも示唆された。Fig. 7の t_1 及び t_2 の撮影画像を比較すると、Exif情報として記録された撮影時の条件はほとんど差異を有しないものの、後者のほうが視覚的情報に富んでいるように見受けられた。 t_1 と t_2 の差はわずか4秒であり海底面の構成はほぼ同一と思われること、また t_3 での異常物撮影時にDVL由来の高度情報に遅延がみられたことから、実際には t_2 では t_1 に比べ海底面に接近していたと推察される。そのため、AUVと被写体との距離の指標としては、DVL由来の高度情報よりもBAS由来の高度参考値のほうが適当である可能性が示唆される。BASとDVLではその視野方向や計測原理の違いから計測値が異なる特性を持つことは当然であり、特に低高度での地形への追従や障害物回避においては、BAS計測値による高度情報がより高い重要性をもつ可能性がある。faultの発生を予防するための現実的な対応策としては、BASの閾値をある程度の余裕を見込んで設定し、DVL由来の高度値が安易に下限値に近づかないようにすることが考えられる。また、測線航走中の上昇・下降動作が高度値のふらつきに与える影響について今後検証するためには、異なる斜度をもった測線での航走を試行することが必要になると考えられる。

6.3 絶対位置推定に関する事項

USBL音響測位については、AUVの光学観測に対する有効性は依然として検証できていない。前述のとおり測位の品質が高くないため、とりわけ深海域において低高度での調査を行う場合には、海域の選定に細心の注意を要すると思われる。また、海底が仮に平坦であっても、撮影した画像の絶対位置を高い信頼性をもって特定することは不可能である点に留意が必要である。反対に、沈船や海底設置型の人工構造物のように位置が限定的な物体を観測対象とするのであれば、音響的に観測した情報と結びつけることにより事後

的に位置補正量を求めることは可能となる。

なお、令和2(2020)年1月に就役した海上保安庁の測量船「平洋」には昇降装置が搭載されており、USBL機器を船体に固定して使用することが可能となっている。音響ビームのジオメトリの安定化による測位精度の向上が期待されるため、AUVの絶対位置推定がどの程度改善されるか、今後実海域において検証されるべきである。

7 おわりに

海底への異常接近リスクを低減するために更なる調整は必要であるものの、本稿で示した潜航結果は、「ごんどう」を用いた海底光学観測の定常的な実施に向けて道標を示すものであると考える。今後も、安全かつ安定的な調査手法の確立に向けて検討を続けていく。

謝 辞

測量船「拓洋」の船長並びに乗組員の皆様には、AUVの安全かつ安定的な運用の実現に向けて、また特に困難なAUVの回収方法の確立にあたり多大な努力を賜った。旧・海洋調査課大陸棚調査室及び現・大洋調査課の歴代AUV運用担当の皆様には、AUVの導入以来、運用経験の蓄積と、それに伴う有益な資料の充実化を経て、今日に至る調査の礎を賜った。また、「ごんどう」製造元であるInternational Submarine Engineering Ltd.、及び同型AUVの運用に長年の実績を有する深田サルベージ建設株式会社には、当庁でのAUV運用に関し多くの技術的な助言をいただいた。ここに記して謝意を表する。

文 献

浅野佑香・増田康佑・大辻由希・杉本慎吾・後藤慎二・Alexey Popov (2022) AUV「Deep1」による巡航式Photo Survey, 第29回海洋工学シンポジウム, 日本船舶海洋工学会・日本海洋工学会, オンライン開催。
iXblue (2016) PHINS surface-product specification, iXblue, Saint-Germain-en-Laye.

- 栗田洋和・瀬田英憲・梅田安則・南 宏樹・井城 秀一・大泊理八・橋詰未来 (2014) 自律型潜水調査機器「ごんどう」の運用, 海洋情報部研究報告, 51, 98-105.
- 栗田洋和・瀬田英憲・南 宏樹・瀬尾徳常・井城 秀一・梅田安則 (2015) AUV「ごんどう」の潜航調査で発生した“fault”の原因及び対策, 海洋情報部研究報告, 52, 33-39.
- McPhail, S., M. Furlong, and M. Pebody (2010) Low-altitude terrain following and collision avoidance in a flight-class autonomous underwater vehicle, Proc. Inst. Mech. Eng. M: J. Eng. Marit. Environ., 224, 279-292.
- 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, 59, 46-63.
- 長澤亮佑・田中喜年・齊藤康仁・池内柚か愛・川内野 聡 (2019) AUV「ごんどう」による海底光学マッピング—初期運用成果報告—, 海洋情報部研究報告, 57, 101-119.
- Newman, K. R., M.-H. Cormier, J. K. Weissel, N. W. Driscoll, M. Kastner, E. A. Solomon, G. Robertson, J. C. Hill, H. Singh, R. Camilli, and R. Eustice (2008) Active methane venting observed at giant pockmarks along the U.S. mid-Atlantic shelf break, Earth Planet. Sci. Lett., 267, 341-352.
- Teledyne RD Instruments (2009) Navigator Doppler velocity log technical manual, Teledyne RD Instruments, Poway CA.
- 伴う海底への異常接近リスクの低減策は今後も検討すべき課題である.

要 旨

AUV「ごんどう」を用いて海底光学観測を実施する際の運用法について検討した。航行型AUVの特性を踏まえた測線設計や障害物回避等の事前設定について検討するとともに、実海域における試験結果を示した。緩やかな傾斜地において海底上7mの高度を維持したまま観測を行うことが可能であると認められたが、低高度観測に