

AUV 「Deep1」 による巡航式 Photo Survey

浅野 佑香 深田サルベージ建設(株)
増田 康佑 深田サルベージ建設(株)
大辻 由希 深田サルベージ建設(株)
杉本 慎吾 川崎地質(株)
後藤 慎二 川崎地質(株)
Alexey Popov Ocean Floor Geophysics Inc.

Cruising Photo Survey by AUV *Deep1*

Yuka ASANO FUKADA SALVAGE & MARINE WORKS CO., LTD.
E-mail: asano.yuka@fukasal.co.jp
Kosuke MASUDA FUKADA SALVAGE & MARINE WORKS CO., LTD.
Yuki OTSUJI FUKADA SALVAGE & MARINE WORKS CO., LTD.
Shingo SUGIMOTO Kawasaki Geological Engineering Co., Ltd.
Shinji GOTO Kawasaki Geological Engineering Co., Ltd.
Alexey POPOV Ocean Floor Geophysics Inc.

Abstract

An underwater camera system was installed on cruise-type AUV (Autonomous underwater vehicle) *Deep1* in 2020 and tested in a sea trial of photo survey in August 2021. In the sea trial, *Deep1* flew above a shipwreck and took photographs with a frequency of 1.5 photographs per second. *Deep1* was set to fly on the survey lines with 1m interval in between and at the altitude of 8m, resulting in the success of making an ortho-photo mosaic image through image processing such as correction of luminance and color coordination and alignment of the processed photographs. Furthermore, the most efficient interval of survey lines was verified by reducing the number of the survey lines used for making a mosaic image. Comparing mosaic images made with the photographs from survey lines with interval of 2m, 3m and 4m (whose ratios of overlaps of photographs between adjacent survey lines are 73%, 60%, and 46%, respectively), we concluded the interval of 3m was the most efficient in making a mosaic image. Assuming an 18-hour-dive of photo-survey with 8m-altitude and 3m-line-spacing, the size of a mosaic image obtained from one dive is calculated to be 291,600m².

1 はじめに

深田サルベージ建設(株)が保有する 3,000m 級の巡航型 AUV (自律型無人潜水機)「Deep1」は 2012 年の導入以降、日本近海における海底熱水鉱床やメタンハイドレート等の海洋資源調査に従事し、新たな鉱床等の発見に貢献してきた。これまでの音波探査機器を利用した調査に加えて、AUV により海底を写真撮影して底生物や海底の底質、岩石の種類といった海底環境を光学的に観測することを目指し、2020 年にアップグレードを実施し新たにカメラシステムを AUV に搭載した。

これを受けて、2021 年 8 月、駿河湾にて AUV のカメラシステムを利用した巡航式 Photo Survey の実海域試験を行った。AUV は巡航速度 1.5m/s で航行しながら海底の写真撮影を行い、AUV 潜航後に取得画像を処理することで 3 次元の海底マッピング画像の作成を試みた。

本稿では実海域試験における、AUV による海底写真の撮影条件と、取得した画像の処理方法及び処理結果について述べ

る。更に、カメラシステムを利用した AUV 調査を効率的に運用するための AUV 潜航条件について考察する。

2 AUV システムの概要

2.1 AUV 「Deep1」

AUV 「Deep1」は International Submarine Engineering 社製の巡航型 AUV Explorer で、最大水深 3,000m まで潜航可能である。AUV の仕様を Table 1 に示す。

Table 1 Specification of AUV Deep1

全長/直径/幅	4.6m/0.69m/1.47m
重量	950kg
速力	1.5m/s (最大 2.6m/s)
潜航時間	最大 24 時間

AUV の主要な制御機器及び音響計測機器の詳細を Table 2 に、AUV への搭載配置を Fig.1 に示す。潜航中の AUV は、

慣性航法装置 (INS : Inertial Navigation System) による加速度測定と、ドップラー速度ログ (DVL : Doppler Velocity Log) による対地 (海底) 速度及び移動方向測定の演算結果から得た推測位置を基に行動する。

Table 2 AUV survey equipment

慣性航法装置	iXblue 社製 PHINS
ドップラー速度ログ	Teledyne 社製 RDI WHN300
マルチビーム音響測深機	R2Sonic 社製 Sonic2022
サイドスキャンソナー・サブボトムプロファイラ	EdgeTech 社製 2200M

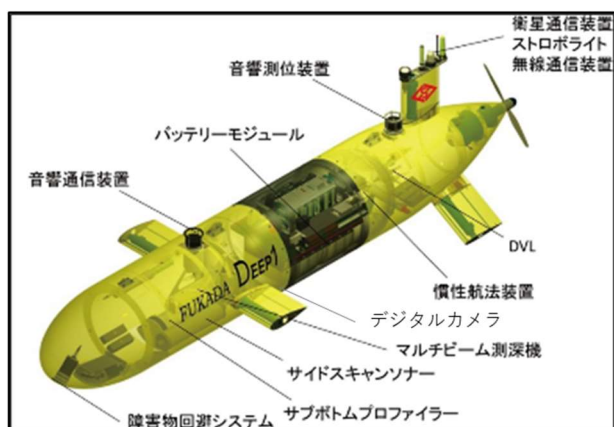


Fig. 1 AUV payloads

AUV 調査の作業母船には総トン数 698t の作業船「新竜丸」を使用し、AUV 専用の投入揚収装置 LARS (Launch and recovery system) の他、調査用の資機材を艀装する。

2.2 測位・通信機器

AUV 母船「新竜丸」の測位には船位保持装置用の GNSS を使用する。更に、潜航調査中の AUV の測位のために USBL 方式の音響測位装置、通信のために音響通信装置を使用する (Table 3)。船上の監視員は音響測位により取得した AUV の位置をリアルタイムに監視し、AUV の位置が計画測線から外れていることを確認したら、音響通信により船上から AUV へコマンドを送って位置を補正する。音響測位装置は 2 種類搭載し、状況に応じて切り替えが可能であり、調査位置データの取得および安全運航の両面でバックアップを取っている。

Table 3 Acoustic positioning and communication equipment

音響測位装置	iXblue 社製 GAPS Kongsberg 社製 HiPAP (いずれか使用)
音響通信装置	Sercel 社製 MATS3G

3 巡航式 Photo survey の実海域試験

3.1 水中カメラシステム

水中での写真撮影を行うカメラシステムとして、1 基の水

中カメラ Cathx Ocean M12 と 2 基の LED ストロボライト Cathx Ocean Aphos を AUV に搭載した。カメラは AUV 底面に搭載され、LED ストロボライトはカメラを挟んで AUV の船首部と船尾部に配置されている (Fig.2)。水中カメラシステムの仕様を Table 4 に示す。合焦の方式は、DVL から入力される AUV 高度の推定値に合わせてリアルタイムに調整する、アクティブ方式のオートフォーカスを使用する。



Fig. 2 Camera system

Table 4 Specification of camera system

水中カメラ	
レンズ焦点距離	24mm
撮像素子	Bayer 配列 CMOS イメージセンサ
解像度	4,096px×2,304px
ストロボライト	
色温度	5,700K
最大光束	150,000lm
露光時間	1ms を基本とし自動露光設定

3.2 実海域試験の概要

実海域試験は 2021 年 8 月 21 日、駿河湾三保沖の海域にて実施した。基地の撮影対象がある試験海域として、沈船が確認されている海域¹⁾を選定した (Fig. 3)。試験当日は Table 5 に示す通り約 3 時間の試験潜航を実施した。



Fig. 3 Survey area²⁾

Table 5 AUV run time of sea trial

潜航時刻	15時26分50秒
浮上時刻	18時33分41秒
調査時間	3時間5分50秒

3.3 AUV 潜航条件

本実海域試験では、AUVの潜航条件を次のように設定した。AUVの巡航速度は通常の音響探査と同様に1.5m/sとした。水中カメラを搭載したホバリング型AUVの巡航速度は一般に0.2m/s~0.3m/sであり、巡航型AUVでは広範囲を効率よく水中撮影することが可能であると考えられる。撮影した画像の輝度を大きくするためにAUVの航走高度を可能な限り低くする必要があるが、低高度で航行した場合AUVが海底の障害物と衝突する恐れがある。両者を考慮した結果、本実海域試験では、沈船の規模も考慮して、AUVの航走高度は8mに設定した。また、モザイク図作成において重複する画像のマッチングを容易にするため、重複率が大きくなるよう測線間隔は1mとして測線計画を作成した。AUVによる水中撮影の対象である沈船の全長をおよそ30mと推定し、東西60m×南北120mの範囲を調査するため測線数を61本とし、測線を南北方向に設定した。結果、測線の総延長は約7,320m、面積は7,200㎡の範囲を潜航調査した。本実海域試験は、1秒に1.5枚の頻度で写真を撮影し、約3時間の試験潜航で1測線当たり平均約173枚、合計10,537枚の画像を取得した。

4 水中写真モザイク画像の作成

Fig.4に示す処理手順¹⁾で取得画像とAUVの位置データに対して処理を実施し、モザイク画像を作成した。

取得画像には、INSで計測された位置データが撮影時刻と合わせて付加されているが、その位置データは、後述する系統誤差(ドリフト誤差)を伴うため、修正する必要がある。また、取得画像は、輝度が均質でなく、色調も調整する必要がある。輝度と色調の補正後の画像に対して、後述するモザイク作成ソフトウェアを用いて、オルソ変換、修正した位置データを基にした画像の自動マッチングを実行し、モザイク画像を作成した。

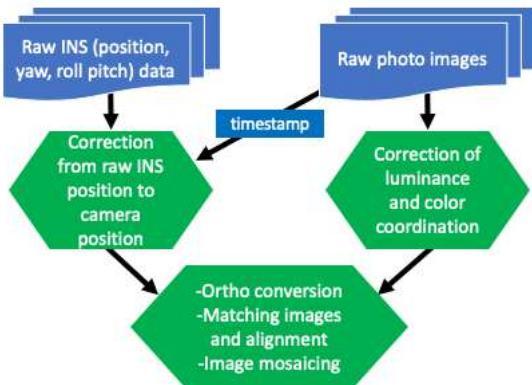


Fig. 4 Processing flow chart to make ortho-mosaic image

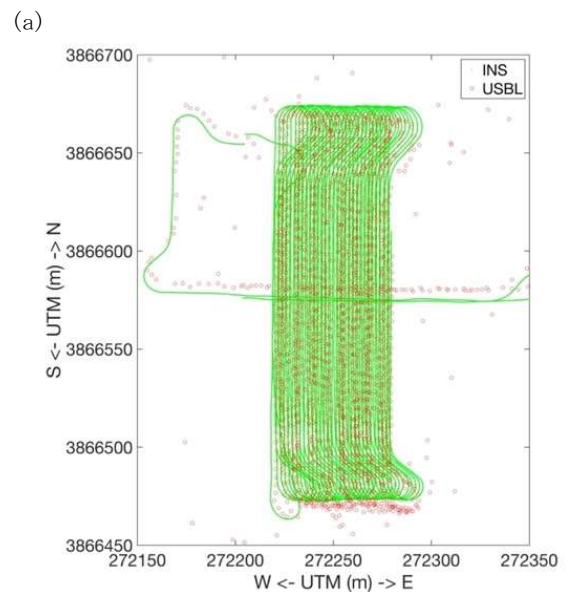
4.1 カメラ撮影位置の修正

AUVの位置は、AUV機内に搭載されるINSとAUV母船から音響測位を行うUSBLの2種類の計測(Fig.5)で管理される。

短時間におけるINSによる位置計測精度は非常に高い(偶然誤差が非常に小さい)。しかし、AUVが海面から降下中の時などのDVLによる対地速度データがINSに入力されない時、位置の算出過程における加速度の積分に伴う誤差の蓄積によって、INSが出力するAUVの位置は、真の位置から徐々に外れる(ドリフト誤差)。一方、USBLは、母船上のGNSSアンテナ位置を基準として、音響測位でAUVの位置を計測する。USBLに伴う偶然誤差はINSより大きい、ドリフト誤差は基本的に非常に小さい。

AUVの位置修正のために、まず、INSとUSBLによる位置データを測線別で区切った。直線性が高いINSによる位置データを線分として扱い、その各線分を測線別のUSBLの位置データに対して最小二乗法を基にした2次元の直線フィッティング³⁾を行った(Fig.6)。Fig.6中の黒曲線と黒矢印は、それぞれ母船の航跡とその船首方位を示す。さらに、そのフィッティング後のINS位置データをAUV座標系の原点とし、その原点からのカメラレンズの中心位置までのオフセットベクトルと、INSで計測された姿勢角(方位角、ロール角、ピッチ角)を用いて、各画像に対する撮影位置を算出し、その撮影位置データで画像に付加された位置データを修正した。

撮影位置は、各測線のINSによる位置データを同じ測線のUSBLによる位置データに対して2次元フィッティングをしていることから、撮影位置の計測誤差は、USBL測位に伴う偶然誤差を含むと考える。この偶然誤差を評価するために、AUVは測線上を概ね直進していたことを前提として、全測線のUSBLによる位置データに対して2次元の直線フィッティングを行い、その直線とUSBLによる測位位置との差の平均と標準偏差を算出した(Fig.7)。その結果、平均的な差の平均と標準偏差は、 $1.8 \pm 0.1m$ であった。



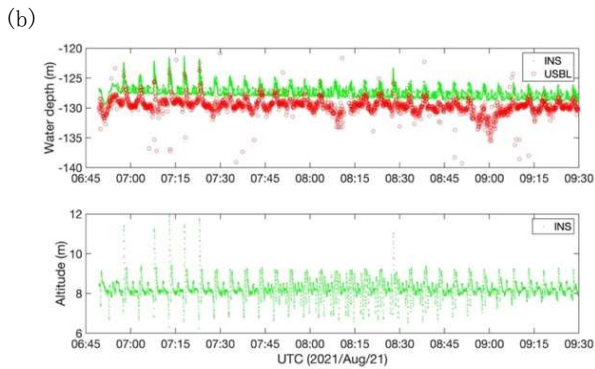


Fig. 5 AUV position measured by INS and USBL in horizontal(a) and timeseries(b) plot

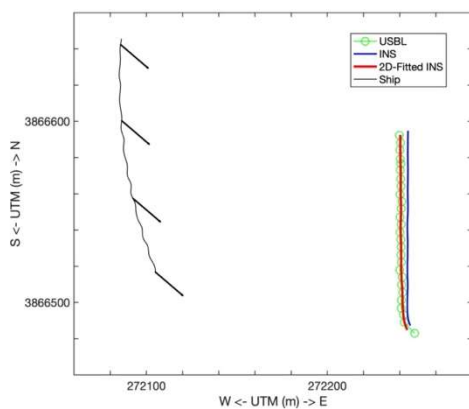


Fig. 6 Example of two-dimensional fitting of INS position to USBL position

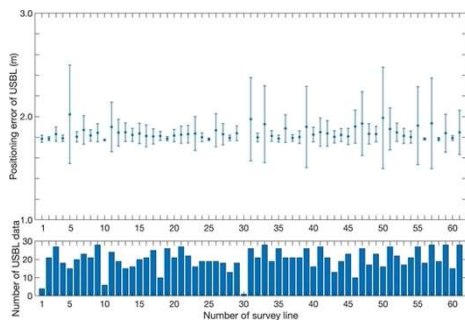


Fig. 7 USBL positioning error and number of USBL data in each survey line

4.2 取得画像

南北方向の測線 61 本と東西方向で横断する 2 測線で水中カメラ撮影を実施した。沈船の一部を撮影した取得画像の一例を Fig.8 に示す。取得画像は、海水の濁度や吸光の影響で全体的に青みがかった色調で、太陽光が届かない海中での人工光源下での撮影で光量にむらが生じ、各画像の周縁部で輝度が低下した。

AUV の航走高度を 8m で一定とした時の取得画像のサイズは、測線方向 (AUV の進行方向、以後、縦方向と記す) では

約 4.2m、測線と直交方向 (以後、横方向と記す) では約 7.5m である。撮影頻度を 1 秒間に 1.5 枚とし、測線の間隔が 1m、AUV の航走速度が 1.5m/s という条件で撮影した結果各取得画像の撮影範囲の重複率は、各画像の縦方向で 64%、横方向で 86%であった。

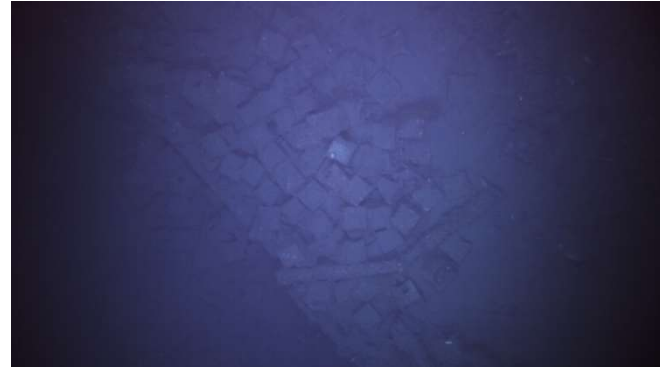


Fig. 8 Example of raw image

4.3 輝度・色調補正

取得画像の輝度及び色調補正には、カメラシステムの製造会社によって提供された画像処理ソフトウェア Cathx Ocean Image Correction ver.1.1.1.0 を使用した。このソフトウェアを用いて、輝度の不均質を統計的に調整するマスク画像を作成し、各画像に対して、このマスク画像で除算を行い、画像周縁部の輝度を調整した。また、輝度の均質化と同時に自動で色調補正が行われ、光が海中を透過する間に劣化した色調情報の復元が試みられた¹⁾。このソフトウェアを用いて Fig.8 に対して画像処理を施した結果を Fig.9 に示す。以後の本文中では、輝度及び色調の補正処理を画像処理と記す。



Fig. 9 Example of image processed after correction of luminance and color coordination

4.4 オルソモザイクング

各画像のオルソ補正、重複する画像の自動マッチングと、マッチング済み画像のアライメントを基にしたモザイク図の作成には、Agisoft Metashape Professional 1.7.3⁴⁾を使用した。水中撮影の位置データと AUV の姿勢データを当該ソフトウェアに読み込ませ、同時に、沈船上の測線で撮影した処理済み画像データを入力し、最終的に 2 次元のオルソモザイク図

を作成した。その結果を Fig.10 に示す。使用した画像数は 723 で、その内、自動マッチングで使用した画像数は 290 であった。オルソモザイク図の作成には Table 6 に示す仕様のコンピュータを使用し、オルソ変換からモザイク図作成までに要した時間は 30 分程度であった。

沈船上で取得した画像の重複率が縦横両方向で 60%以上であったこともあり、連続性が高く尤もらしいオルソモザイク図を作成できた。ただし、沈船上を撮影した画像のみがオルソモザイク図となった。言い換えると、画像中に特徴的な物体や構造がない限り自動マッチングやモザイク図作成の対象とならなかった。また、測線の違いで明暗を確認した。この明暗が沈船の両舷で目立つことから、高度一定で航走する AUV が沈船船体の上り下りの時に AUV のピッチが変化し、それに伴ってストロボの照射具合の変化と合わせて撮影した画像の輝度に変化し、この一連の変化の影響で、輝度の補正が統一的に実施できなかったために明暗が生じたと推察する。

2 次元のオルソモザイクを作成する過程で、当該ソフトウェアでは、3 次元の高密度ポイントクラウドを作成する。このポイントクラウドから数値標高モデル (DEM : Digital Elevation Model) を出力し、沈船の船首部分を拡大した DEM を Fig.11(a) に示す。同じ描画範囲のオルソモザイク図を Fig.11(b) に示す。オルソモザイク図では、直径 20cm 長さ 50cm 程度の円筒状の物体を多数確認できる。一方、DEM 図では、オルソモザイク図で見られる円筒状の物体を概ね一対一で同定できる程度の品質であった。オルソモザイク図作成の過程で出力した DEM から高分解能の沈船形状も把握できた。この DEM で表現された沈船形状と、水中撮影と並行して行われた音響測深による結果との比較を 5.1 節で述べる。

4.1 節で記した通り、撮影位置の偶然誤差が 2m 程度であっても、高い重複率の効果でオルソモザイク図が作成できたと判断する。撮影位置の誤差は一定で横方向の重複率を下げた時のオルソモザイク図の品質を 5.2 節で議論する。

Table 6 Specification of computer to make the ortho-mosaic images

プロセッサ	第 10 世代 インテル® Core™ i7 (8-コア, 16MB キャッシュ, 最大 5.0GHz)
メモリ	32GB DDR4 2,933MHz
ビデオカード	NVIDIA® GeForce RTX™ 3080 16GB GDDR6



Fig. 10 Ortho-mosaic image with 1m interval of survey lines using high accuracy of alignment of images

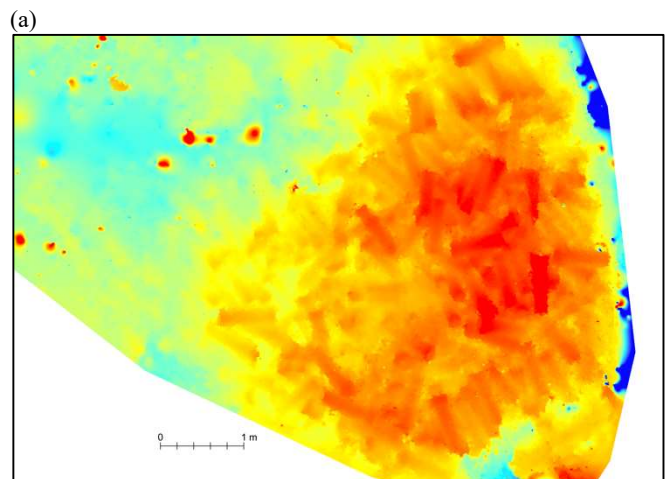


Fig. 11 Digital elevation model(a) and ortho-mosaic image(b) at the bow of the shipwreck

5 考察

5.1 音響測深と DEM による沈船形状の比較

オルソモザイク図の作成過程で、DEM データを作成した。沈船の DEM を Fig.12(a)に示す。等深線間隔を 20cm とした。一方、本実海域試験では、水中撮影と並行して AUV 搭載のマルチビーム音響測深機 (MBES) を使って測深を実施した。MBES による測深は、一般的には海底地形の測量に使われ、この測深結果を Fig.12(b)に示す。測深点データを 25cm 間隔で 3 次元格子化し、等深線間隔を 20cm で図化した。Fig.12 の両図の沈船船体の幅と全長の比は、概ね一致した。また、Fig.12(b)で見られる沈船船上の 3 箇所の高まりの広がりには、Fig.12(a)で表現された沈船船上の高まりの広がりとは一致した。MBES 測深で検出された沈船形状とオルソモザイクで検出したそれは一致し、オルソモザイクでは不自然な歪がない沈船画像を得られたと判断した。

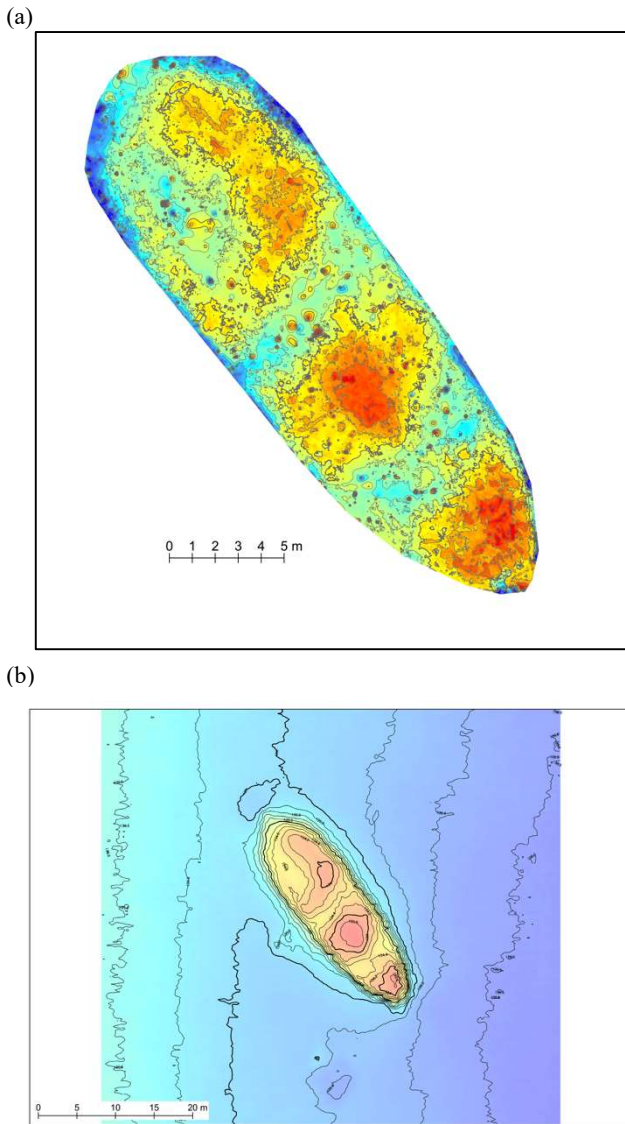


Fig. 12 Digital elevation model(a) and bathymetric image (b) of the shipwreck

5.2 最適な測線間隔

本実海域試験での撮影位置データには、USBL 由来の偶然誤差 2m 程度を含むと 4.1 節で見積もった。この誤差は一定として、取得画像の測線を横断する方向 (横方向) の重複率を変えてオルソモザイク図の作成を試みた。取得画像の横方向の重複率を下げるということは、測線間隔を広げることと等しく、撮影効率を上げることでもある。

ここでは、沈船上を通過して撮影した測線の間隔が 2m, 3m, 4m になるように取得画像を選別し、それぞれの取得画像セットで作成したオルソモザイク図を Fig.13, Fig.14, Fig.15 に示す。測線間隔が 2m, 3m, 4m の時の横方向の画像の重複率は、それぞれ 73%, 60%, 46% である。測線間隔 2m の場合のオルソモザイク図 (Fig.13) は、測線間隔 1m の場合のその図とはほぼ同等の品質であったと判断した。Agisoft Metashape では、画像のアライメント精度を調整可能で、測線間隔 3m の場合のオルソモザイク図 (Fig.14) は、そのアライメント精度を測線間隔 1m 及び 2m で使用した「high」と、「medium」で調整し、測線間隔 4m の場合 (Fig.15) は、「medium」と「low」で調整して、それぞれで 2 種のオルソモザイク図を作成した。測線間隔 3m の場合のオルソモザイク図は、アライメント精度が「high」の時は、オルソモザイク画像に空白ができてしまったが、アライメント精度を「medium」とした時は、測線間隔 1m と 2m の場合と同程度の品質であると判断する。一方、測線間隔 4m の場合は、いずれのアライメント精度で調整しても、一部欠落したオルソモザイク図となった。以上のことから、当該ソフトウェアの使用で画像の解像度が極端に劣化することはなく、アライメント精度を調整し、空白のない画像を作成することが重要であることが分かった。また、AUV の航走高度が 8m 一定で、撮影効率を考慮すると、現状では測線間隔 3m 以下 (横方向の重複率 60%以上) であれば、オルソモザイク図の作成が可能であると判断した。

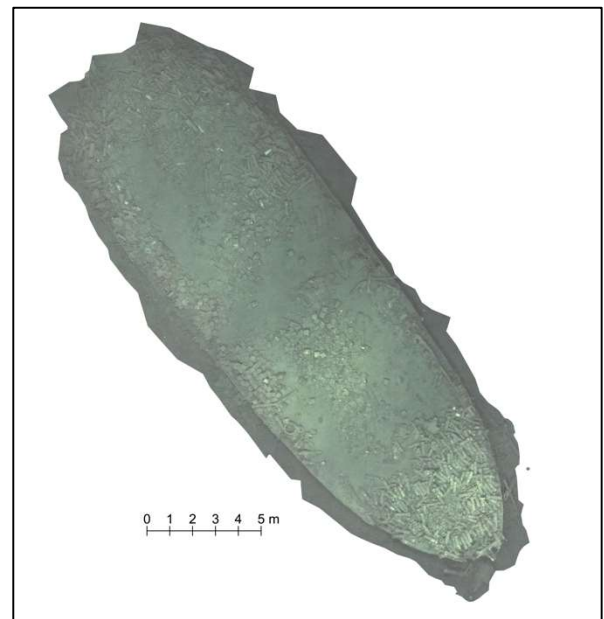


Fig. 13 Ortho-mosaic image with 2m interval of survey lines using high accuracy of alignment of images

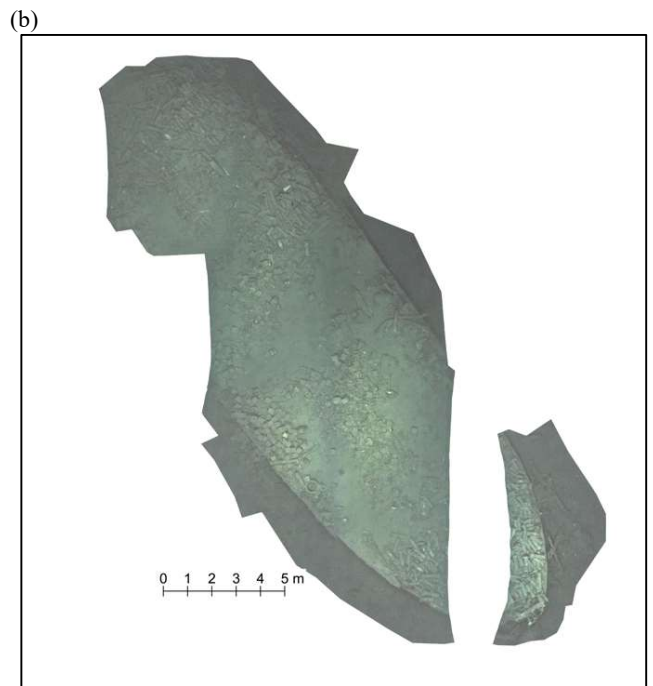
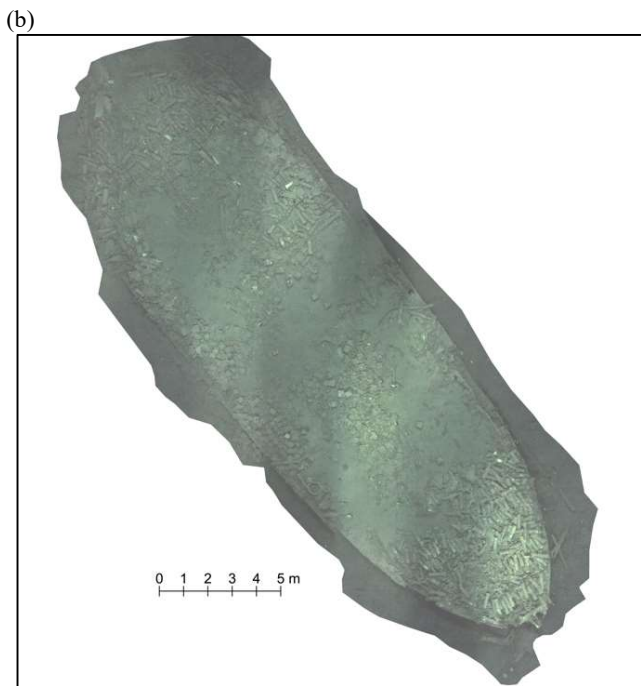
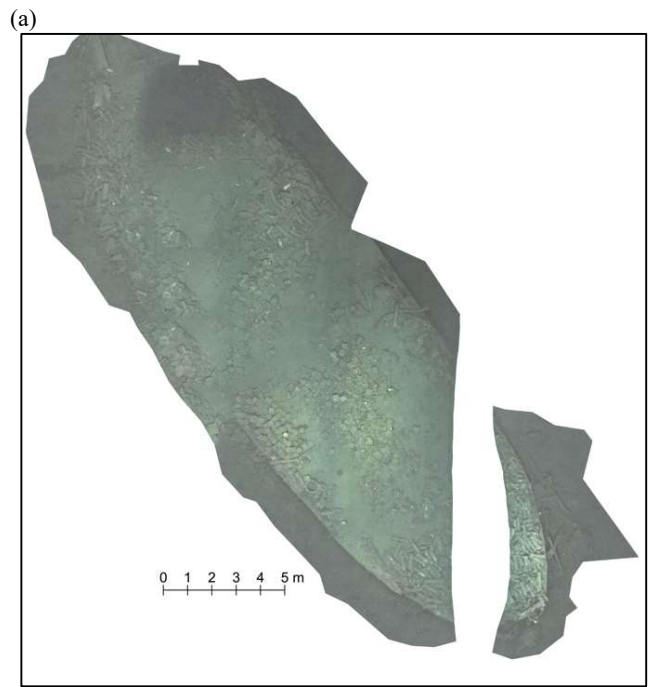
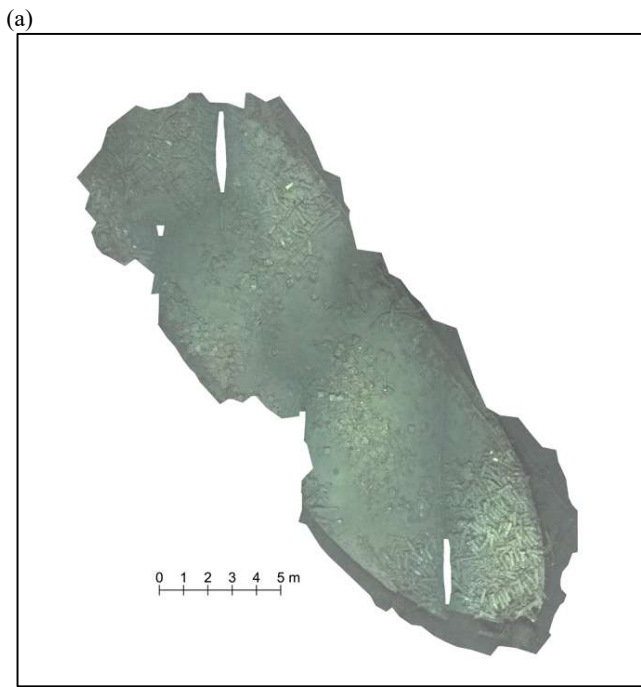


Fig. 14 Ortho-mosaic image with 3m interval of survey lines using (a)high and (b)medium accuracy of alignment of images

Fig. 15 Ortho-mosaic image with 4m interval of survey lines using (a)medium and (b)low accuracy of alignment of images

5.3 撮影効率と最大の撮影面積

前節までの考察を通して最適な撮影効率を検討すると、AUVの航走速度1.5m/s、高度8m一定で撮影を行なった場合、測線間隔は3m（重複率60%）が良いと判断した。この条件を基にして、最大の撮影面積を試算した。1潜航当たりの海底での撮影時間を18時間とした場合、総撮影面積は291,600㎡と見積もられ、これはシングルテニスコート約1,490面分の面積と等しい。

6 おわりに

本稿では、駿河湾で実施した実海域試験で連続撮影した海底画像の処理方法とその処理結果を示し、それを基にして、AUV調査の効率的な運用方法について検討した。その結果、AUVの航走速度を1.5m/s、高度を8mと設定した時に、測線間隔は3mを基準として潜航計画を設定できるということが分かった。海底画像とマルチビーム音響測深機及びサイドスキャンソナーの取得データを組み合わせることで、海底面の地形や状況を総合的に把握することが可能であると考えられる。本実海域試験で撮影の対象物としたのは沈船であったが、同様に海没した船舶・航空機の調査や、3,000mの最大潜航深度を活かして海底資源調査への利用も期待される。資源調査の目的で撮影を行った場合にも同様の潜航条件でモザイク図の作成が可能であるか、今後さらに詳しく検討する予定である。

参考文献

- 1) 長澤亮佑他：AUV「ごんどう」による海底光学マッピング-初期運用試験報告-，海洋情報部研究報告，第57号，pp.101-119，2019
- 2) 海洋状況表示システム（<https://www.msil.go.jp/>）を加工して作成
- 3) Awaya, T.: Two-dimensional curve fitting in counting experiments, Nuclear Instruments Methods, 212, pp.311-317, 1983
- 4) Agisoft LLC: Agisoft Metashape User Manual, Professional Edition Version 1.7, 2021