

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—[†]

長澤亮佑*, 田中喜年*, 齊藤康仁*, 池内柚か愛*, 川内野聡*

Seafloor optical mapping by AUV *Gondou*: the first sea trial report[†]

Ryosuke NAGASAWA*, Kitoshi TANAKA*, Koji SAITO*,
Yukao IKEUCHI*, and Satoshi KAWACHINO*

Abstract

A downward-looking optical mapping system was newly installed on AUV (autonomous underwater vehicles) *Gondou*. This paper presents our approach for seafloor optical mapping using the *Gondou*, and reports the result of the first sea trial in April 2018. The *Gondou* dived to a depth of 130–140 m and took photographs at the altitude of 8–10 m. Most of the obtained seafloor images were insufficiently illuminated due to the relatively higher cruising altitude and water turbidity. However, for a part of the images taken above a shipwreck, the image-aligning processes worked well and a photomosaic was created. The optical mapping approach seems to be effective for the seafloor with characteristic and optically high-contrast terrain.

1 はじめに

海上保安庁は 2013 年、自律型潜水調査機器 (AUV: Autonomous Underwater Vehicle) 「ごんどう」の運用を開始した (栗田・他, 2014)。本機はこれまで音響観測機器を用いた海底調査を主として実施し、測量船での精密調査が困難な深海底において微細な地形構造を数多く明らかにしてきた。南西諸島弧周辺の複数の海域においては、火山性地形の高分解能な測得と併せて熱水及びガスの噴出を示唆する音響異常を観測するなど、海面下の火山活動の把握に資するデータの収集にも貢献してきている (Minami and Ohara, 2016, 2017, 2018, 長澤・他, 2018)。2018 年には新た

に、「ごんどう」に海底面を撮影するための光学観測機器が搭載された。海底近傍にてデジタルカメラによる連続撮影を行うことで、音波に加えて可視光による海底面マッピングの機能を備えることとなった。

一般に、光学画像は分解能に優れ、また波長の細かな違いが色情報として記録されており、人間にとって直感的に理解しやすいという特徴を持つ (巻, 2015)。AUV を用いた水中での光学観測は国内外で数々の実施例が存在し、その用途は多岐に渡る。たとえば生物学分野では、底生生物の撮影 (Morris et al., 2014, Durden et al., 2016 など) という観点から mm–cm オーダの各種対象物の

[†] Received September 21, 2018; Accepted October 30, 2018

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

判別に活用される。海洋考古学の分野では、海中に沈んだ人工構造物の調査 (Roman and Mather, 2010, Allotta et al., 2015, von Fock et al., 2017 など) が実施されており、調査海域の2次元モザイク画像の作成のみならず、3次元モデルの構築にも活用されている。地球科学に関連した分野では、海底熱水地帯の3次元画像化を可能とするAUVの開発例 (巻・他, 2012, 篠野・他, 2018 など) があり、底質の確認や熱水チムニー等の観測など、複雑な海底環境の詳細な把握を可能にしている。また、電磁波である光の性質を活かして、音波では検出が困難な、媒質との音響インピーダンスの相違が小さい対象の観測にも活用される。例えば山田・他 (2009) では、クラゲの生態調査を目的とした光学観測用AUVの開発について報告されている。

AUVは、空間的な行動の制約が少なく、また高度を一定に保ったまま調査測線上を航行できるなど機動性に優れ、広範囲を一律に調査対象とすることができる。そのため、音響測深をはじめとする地球科学的なデータの取得でその有用性を発揮する (Wynn et al., 2014)。AUV「ごんどう」での安定的な光学観測が実現すれば、従来取得してきた広範囲の高分解能海底地形データに加え、その海域における海底の底質や沈積した人工物、生物など、海底環境についての情報を付加的に与えることになる。音響機器によって取得した海底地形に視覚的情報が加わることで、海底環境の把握のためのより多角的な視点を得ることができ、海洋における自然現象や人的影響のよりいっそうの理解に貢献することが期待される。

本稿では、2018年4月に実施された「ごんどう」初の実海域における光学観測試験について述べる。調査計画と取得データの簡易事後処理、及びオルソモザイク作成について概観し、得られた結果を報告する。

2 調査概要

2.1 海域

2018年4月24日に駿河湾の久能山沖 (水深約

130–140 m) にて潜航調査を実施した。調査海域の位置を Fig. 1 に示す。本海域で存在が確認されている沈船の直上をAUVが航行するようにし、延長300 mの調査測線を東西方向に4本配置し

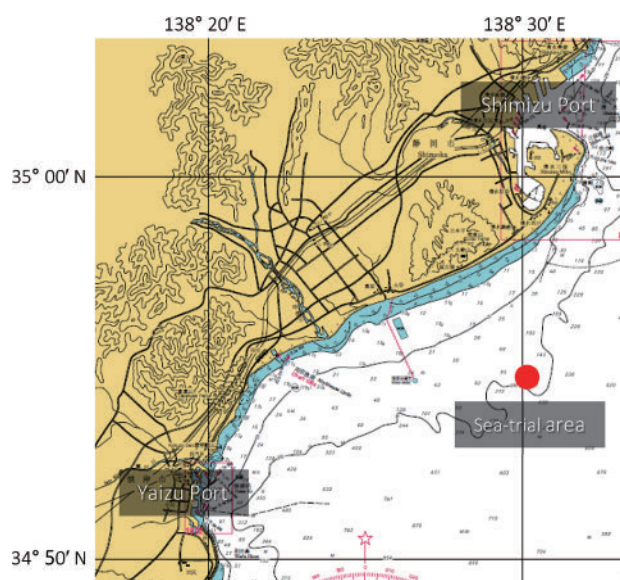


Fig. 1. Sea trial area. The background chart is “W1075 SURUGA WAN”.

図1. 試験実施海域 (背景は海図 W1075 駿河湾)。

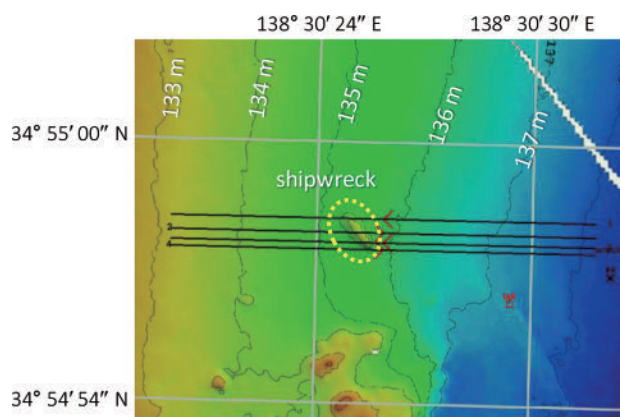


Fig. 2. Bathymetric map including the sea trial area, surveyed by multibeam echo sounder on board the S/V *Takuyo*. Survey lines for the AUV mission are shown as black solid lines. Intervals between each line are 10 m, 7 m and 5 m, respectively from north to south. A shipwreck is located in the area surrounded by yellow dashed line.

図2. 測量船「拓洋」のマルチビーム音響測深機で取得した調査海域の海底地形図。AUVの調査測線を黒実線で示している。黄色の破線で囲んだ範囲に沈船が存在する。

た。測線の間隔は、AUVの航行安定性を確認する目的から一律にはせず、北から10 m, 7 m, 5 mとした。調査海域の海底地形図及び測線の配置をFig. 2に示す。

2.2 調査機器

測量船「拓洋」にて現場海域へ赴き、AUV「ごんどう」(Photo. 1 (a))を投入して調査を実施した。海中でのAUVの速力は従来の海底地形調査(長澤・他, 2018など)と同じく1.5 m/sとした。調査は高度一定及び深度一定の双方で実施し、高度一定の場合は海底上10 mとし、深度一定の場合は126 mに設定した。深度一定時の調査高度は測線全体で8-14 m程度であり、沈船上では8-9 m程度となった。なお、高度8 m付近からの光学撮影は、他機関での運用例(Singh et al., 2004, Roman and Mather, 2010, 卷・他, 2011, Morris et al., 2014, 篠野・他, 2018など)が概ね高度2-4 m程度であることを踏まえると高い設定であるといえよう。AUV「ごんどう」の調査に係る具体の作業工程については栗田・他(2014)を参照されたい。調査に関係するAUV搭載機器の詳細を本節にまとめる。

2.2.1 航法及び測位機器

光ファイバジャイロスコープを内蔵した慣性航法装置(INS; Inertial Navigation System) IXSEA PHINS及びドップラ式対地航行速度測定器(DVL; Doppler Velocity Log) Teledyne RDI Workhorse Navigator DVL 300 kHzを備える。海底面からの高度はDVLによって計測・推定され、深度は水圧式深度計Paroscientific 8CBによって計測される。DVLが得た対地速度はINSに入力され、カルマンフィルタを通じて位置推定に寄与する。

海面航行時には、AUVは自機に備えられたGPS受信機による測位情報に従う。また音響測位トランスポンダを備えており、測量船「拓洋」から投入される音響測位装置との間でUSBL(Ultra-Short Base Line)方式の測位が可能である。

INS単体での航法では位置推定誤差が航続時間に比例して顕著に増大するため、AUVの潜航中はオペレータがUSBL測位の状況を監視し、AUVに対して位置補正情報を送信することでINSに蓄積した誤差を解消する。計画測線上を精度よく航行させるためには、DVLが海底面を捕捉し、対地速度の補償が有効となって以降に補正を実施することが求められる。

2.2.2 光学観測機器

水中撮影用の光学デジタルカメラCathx Ocean MI2と2基のLEDストロボライトCathx Ocean Aphosが「ごんどう」の底面に搭載されている(Photo. 1)。カメラは視線方向がAUVの前後軸に対して垂直下方を向くよう設置され、LEDパネルはAUVの前部と後部に1基ずつ配置されている。撮像素子はBayer配列のCMOSイメージセンサであり、カメラには焦点距離24 mm, F1.4の単焦点レンズが取り付けられている。ストロボライトのLEDは色温度5,700 K, 1基あたりの最大光束は150,000 lmである。

2.3 光学機器の設定

デジタルカメラ及びレンズのパラメータに関して、特筆すべき設定を以下に述べる。

2.3.1 カメラに関する設定

ホワイトバランスはメーカーによるデフォルト設定を採用した。水中での撮影用に調整されており、赤色の成分がやや強めに設定されている。画像のフォーマットはJPEGとし、解像度は測線横断方向に4096 px, 測線方向に2304 pxとした。また、露光時間は1 msを基本とする自動露光設定とし、撮影の頻度は1秒間に1.5枚の割合で高度に依らず一定とした。

一般に、カメラの撮像領域(FOV; field of view)は、撮像素子のサイズ(sensor size)と有効焦点距離(EFL; effective focal length), 及び被写体から焦点までの高度(altitude)を用いて

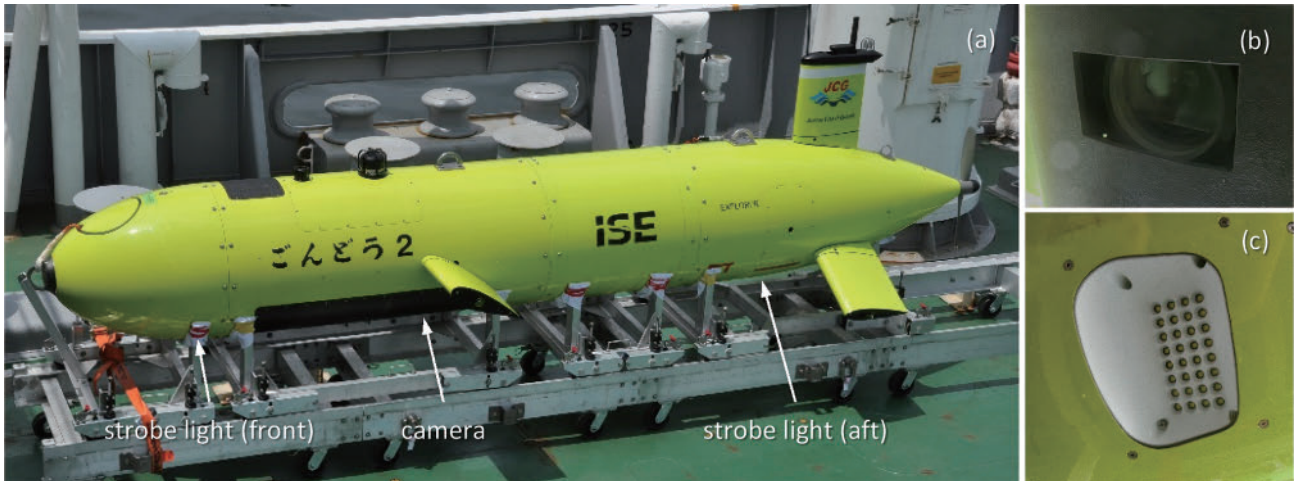


Photo 1. (a) Side view of the AUV *Gondou*. The arrows indicate mounting positions for the optical imaging system. (b) The camera lens on the bottom of the vehicle. (c) The LED panel on the aft side of the vehicle.
 写真1. (a) AUV「ごんどう」の外観。光学機器の設置位置を矢印で示している。(b)「ごんどう」底面の開口部からのぞくカメラレンズ。(c)「ごんどう」の後部底面に設置されたLEDパネル。

$$FOV = \frac{\text{sensor size} \times \text{altitude}}{EFL}$$

と概算される。調査時の設定に基づけば、撮像領域は測線横断方向に高度の約90%、測線方向に高度の約50%であると計算された。また、調査時の速力を1.5 m/sで一定であるとしてこの結果を用いると、高度10 mのときには、撮像領域の重複量は測線方向に約80%であると計算された。

2.3.2 レンズに関する設定

海中での撮影、かつ比較的高い調査高度であることから、撮影される画像は輝度に乏しいことが想定される。撮像素子に入射する光束を最大限確保するためにはレンズの開口を極力広げることが望ましいと考えられ、F値をF1.4に設定した。なお、起伏のある海底面に対して一様に焦点を合わせる必要のある海底撮影では、被写界深度(DOF: depth of field, 付録A.1参照)を広く確保する目的から開口を狭くすることにメリットが存在する(Durden et al., 2016)。しかし、海中撮影としては比較的高い高度で調査することから、F1.4であっても被写界深度は狭くなく、海底面の手前及び奥に少なくとも1 m程度存在すると推測された。加えて、AUVが追従できないような急峻な起伏を伴う地形は本稿で言及する調査海

域には存在しないと考えられることから、上述の設定でも視覚的に顕著な問題を生じないと判断した。なお、一般論としてF値は設定可能な最小値にするのではなく、2段階程度絞ってレンズ中心部の寄与の割合を高めるべきとの記述が多くみられる(Durden et al., 2016など)。本稿での設定はあくまで試験的なものである。

合焦の方式については、DVLから入力される高度推定値に合わせてリアルタイムで調整するアクティブ方式のオートフォーカスを基本とした。一部の測線では比較のため、パッシブ方式のオートフォーカス及び10 mに固定したマニュアルフォーカスでの撮影を試行した。マニュアルフォーカスは調査高度一定の測線でのみ実施した。

2.4 運用面での注意

低高度での調査に伴うAUVの海底への接触の防止、及び接触防止のための過剰な回避行動の防止のため、次の各点について対策を施す必要が生じる。まず調査高度への潜航に際しては、AUVのピッチ角に下限を設定することで、前方及び下方の障害物検知ソナーの検知範囲に海底面がかからないようにする必要がある。加えて、起伏を伴う地形上で予期せぬピッチ動作を避けるため

に、事前に設定した測線上及びウェイポイント以外では低高度での航行を行わないよう設定することが求められる。そのため、調査区域及び潜航ポイントの選定にあたっては測量船による事前調査、及び過去の AUV による測深結果の精査を必要とする。また前述のとおり、INS には位置推定誤差が蓄積するため、極低高度への潜航を始める前には必ず DVL に海底を捕捉させ、位置補正を完了させなければならない点に留意が必要である。

3 画像処理手法

AUV で取得した画像の処理には、カメラの製造メーカーにより提供された画像処理ソフトウェア Cathx Ocean Image Correction ver. 1.1.1.0 並びに写真測量用モザイク作成ソフトウェア Agisoft PhotoScan Professional edition ver. 1.3 (Agisoft LLC, 2018) を用いた。オルソモザイク作成に至る画像処理の過程を以下に示す。

3.1 レンズ歪補正及び輝度補正

光学系に固有の歪曲収差 (青木, 2002 など) が画像にもたらす影響を補正するため、Agisoft PhotoScan のキャリブレーションオプションを使用した (詳細については付録 A.2 を参照)。当該オプションは Brown のレンズ歪モデル (Brown, 1966) を実装している。

AUV による画像は、後述する Fig. 4 に典型例を示すとおり様々な制約を伴う。まず、海中で撮影した光学画像は、海水中の吸光特性を反映して長波長成分において著しい減衰を伴う (Jaffe, 1990, Bonin et al., 2011 など)。全体的に青みがかかった色調になることは避けられず、ポストプロセスでの色調補正が求められる。また、光の減衰を伴う環境でありかつ太陽光の届かない人工光源下での撮影であることから、視野の周縁部で輝度が低下する (Sankpal and Deshpande, 2016 など)。

輝度の空間的不均一の是正と色調補正にあたっては画像処理ソフトウェア Cathx Ocean Image Correction を使用した。このソフトウェアは、輝

度の不均一性についての情報のみが記録されたマスク画像を作成し、生データをそのマスク画像で除算することで輝度の均一化を図るという手法を実装する。すなわち、生データである補正前の画像を $r(x, y)$ 、輝度の空間的不均一が取り除かれた補正済みの画像を $c(x, y)$ としたとき、両者の間に

$$c(x, y) = \frac{r(x, y)}{f(x, y)} \rho$$

という関係式を成り立たせるような画像 $f(x, y)$ がマスク画像である。ここで ρ は画像全体の輝度のレベルを調節する定数である。マスク画像の作成は、複数の撮像データに統計的処理を施し共通情報を抽出することによって行われる。また、輝度の均一化と併せて自動色調補正が行われ、光が海水中を透過する間に劣化した色情報の復元が試みられる (Cathx Ocean Ltd., 2017)。

3.2 位置補正

3.2.1 機器取付オフセットの補正

取得画像のメタデータに収録された位置情報は、INS が推定した自機の位置である。この位置の計測点をカメラ内部の像面中心と一致させるため、機器の取付位置を考慮したオフセット補正を実施した。AUV のピッチ、ロール、ヨー角を用いてオフセットの絶対値を水平方向及び鉛直方向に分解し、メタデータ内の緯度・経度及び高度にそれぞれ加算した。

3.2.2 測線航走誤差の確認

同一の測線上を複数回航走させる際には、測線を反復する度に位置推定誤差が蓄積していくことが予想される。1 m 程度の誤差であっても、真の地点で撮影された画像とは撮像領域が顕著に異なることから、モザイク作成時に画像の整合が精度よく行えない可能性がある。そのため画像のメタデータに保存された撮影位置の信頼性を、以下に示す方法で確認した。

まず、カメラの画角、AUV の姿勢及び高度を用いて、AUV 取得画像の視野を四角形として海

底面に投影した。ここで海底面は平坦であると
し、投影には Wakefield and Genin (1987) の表
式を用いた。そして、モザイク作成に用いる画像
群で互いに共通する被写体をもつものに着目し、
その被写体が海底面上でどの程度の相対位置誤差
を伴っているか検証した。なお、画像のメタデー
タに記録された位置情報はすべて像面の中心点に
おける位置であるとし、その位置から撮像面に垂
直な線に沿って測った海底面までの距離に DVL
由来の高度を当てはめた。

3.3 オルソモザイク作成

画像のオルソ化とモザイク作成のため、写真測
量用モザイク作成ソフトウェア Agisoft
PhotoScan Professional edition ver. 1.3 を使用し
た。まず、3.2 節までの処理を終えた画像データ
をソフトウェアに取り込み、画像のメタデータから
撮影位置、撮影高度及び AUV の姿勢を読み込
んで視覚的情報に基づく画像のアラインメントを

実行した。その後、当該ソフトウェアの基本的な
作業手順である 3 次元の高密度ポイントクラウド
作成を行い、最終的に 2 次元のオルソモザイクを
描画した。なお、ソフトウェア Agisoft
PhotoScan は複数の画像データから被写体の高精
度 3 次元モデルを構築することが可能である。当
該ソフトウェアを海中で取得した実データに適用
した文献例としては、AUV による沈船調査 (von
Fock et al., 2017) のほか、遠隔操作式の潜水調
査機である ROV (Remotely Operated Vehicle) に
よる沈船調査 (Drap et al., 2015)、サンゴ礁の 3
次元モデル化 (Guo et al., 2016) 等が存在する。

4 調査結果及び画像処理結果

4.1 AUV の航跡

AUV は 1 時 25 分 (本稿において時刻はすべて
UTC で表記する) に潜航を始め、4 時 27 分に海
面に浮上した。測線の航走については深度一定で
1 セット 4 本を実施した後、高度一定で 2 セット

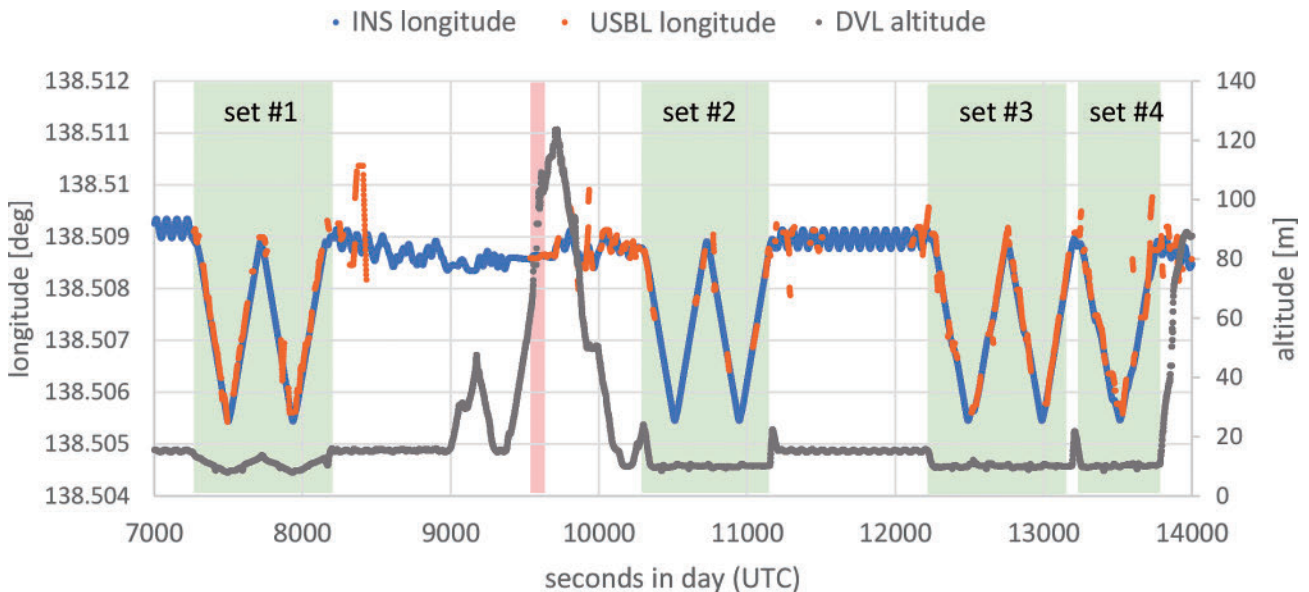


Fig. 3. Longitude and altitude tracking of the AUV during the mission. Horizontal axis shows the total seconds of the day in UTC time. The estimated longitude values based on the INS are plotted with blue dots, whereas the values measured by the on-ship USBL positioning with orange dots. The vehicle altitude measured by the DVL is presented in gray dots. The green-colored areas correspond to the time the AUV survey stayed on planned lines; the red-colored area indicates where the DVL bottom-locking was lost.

図 3. ミッション中の AUV の経度及び高度。横軸は調査日の UTC 通算秒。INS による推定経度値を青色で、USBL 測位による経度値を橙色で示している。灰色の点は DVL が取得した海底からの高度である。緑色の領域は AUV が測線上を航行していた時間を、赤色の領域は DVL が欠測していた時間をそれぞれ表している。

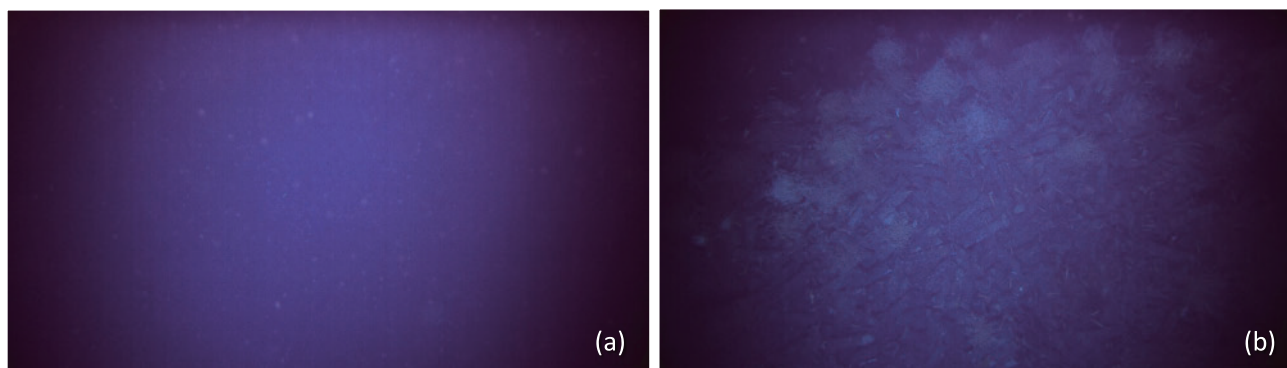


Fig. 4. Original images obtained by the AUV's digital camera. (a) Photograph taken at the altitude of 10.2 m above seafloor, where it is assumed to be covered by sediments. Identification of the seafloor is extremely difficult due to insufficient illumination and contrast. (b) A typical photograph above the shipwreck, taken at an altitude of 9.2 m. Illumination of the image is similarly low, however some structures such as rubbles on the shipwreck are visible.

図4. AUV搭載のデジタルカメラで取得された画像。(a)は堆積物で覆われていると思われる場所で、高度10.2 mから撮影した海底面の画像。海底を識別するには輝度及びコントラストが著しく不足している。(b)には沈船上で撮影された典型的な画像を示している。撮影高度は9.2 mであり、輝度は(a)と同様に低いものの、沈船の上に散乱するがれき状の構造物が見てとれる。

各4本を実施し、最後の4セット目は1本目と2本目の測線のみ高度一定で実施した。Fig. 3は、調査中のINS及びUSBLの取得データからAUVの経度、並びにDVLの取得データからAUVの高度の時間的変化を抜き出してプロットしたものである。途中、セット1とセット2の間にAUVの上昇を伴う回避行動が発生し、ピッチが上向きとなったために2時39分13秒から約38秒間DVLが欠測した。DVLが欠測したのはその事象においてのみであり、AUVの海面投入からミッション終了までの他のすべての期間において対地速度補正は有効であった。なお、潜航中のINSの位置推定誤差は、USBL測位との間に顕著な系統的差異を見出せるレベルを下回っていたため、手動での位置補正は実施していない。

4.2 取得画像

潜航中はすべての測線において光学撮影を実施した。しかし、調査高度の設定に比して海水の濁度の高さが顕著であったとみられ、被写体に乏しい海底面については極端にコントラストの低い画像となった。堆積物に覆われた海底面、及び沈船を撮影した典型的な画像をFig. 4 (a)及び同(b)

に示す。いずれも高度一定での調査時にアクティブ方式のオートフォーカスを用いて撮影されたものであり、レンズ歪補正前の画像である。沈船以外の場所で撮影した画像はすべて、Fig. 4 (a)と同様に極めて低コントラストの状態にあり、海底の視覚的情報は著しく損なわれ、底質の判別はきわめて困難である。一部画像においては海底面に窪みのような地形が複数存在することがかろうじて確認できたものの、明瞭さを欠いておりモザイクキングが有効なレベルにはない。一方、沈船上で撮影された画像(Fig. 4 (b))は暗いものの、人工物及び生物とみられる様々な被写体を捉えていることが確認できる。

4.3 輝度・色調補正

Cathx Ocean Image Correctionを用いて作成したマスク画像を用い、すべての撮像データに輝度補正を施した。マスク画像の作成には、撮像データのうちモザイク作成に用いた画像と同一の設定の下に取得され、かつ顕著な被写体が写っていない画像を25枚選出して用いた。マスク画像をFig. 5 (a)に、またそのRGB色空間における各色の明度をFig. 5 (b)に示す。なお、すべての

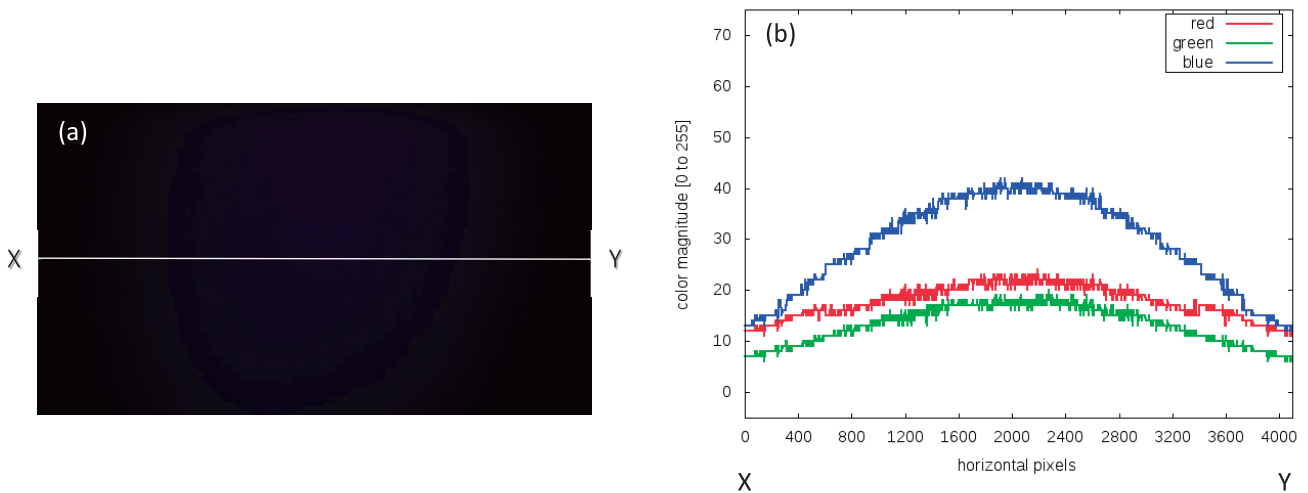


Fig. 5. (a) The mask image used to adjust the non-uniform illumination in all photographs taken by the AUV. Generated by the automated statistical process implemented in the software Cathx Ocean Image Correction. (b) RGB color brightness on the line X-Y in the mask image. The brightness takes values from 0 to 255.

図 5. (a) AUV 取得画像の輝度補正に用いたマスク画像. ソフトウェア Cathx Ocean Image Correction によって自動的に生成されたもの. (b) 画像中の線分 X-Y 上のピクセルがもつ RGB 色空間における明度値. 0 から 255 までの諧調で表現している.

撮像データは合焦方式を除いてすべて同一の環境下で取得されているため、輝度の均一化にあたっては一枚のマスク画像を共通して使用した。輝度・色調補正の効果を示す典型的な例として、沈船上で撮影された画像を Fig. 6 (a1) に、またその画像に輝度の均一化及びレンズ歪補正を施した結果を Fig. 6 (a2) に示す。Fig. 6 (a2) はレンズ歪のキャリブレーションによって撮像領域は樽型に補正され、光軸中心とのアライメント補正のために画像が一様に下側へ移動している。Fig. 6 (b1), (b2) には、Fig. 6 (a1), (a2) それぞれの色調に関する情報を示した。補正を経て輝度の空間的不均一が軽減され、周縁部での明度が上昇し、代わりに中心部で明度が減少した。また、色調補正によって青色の突出が軽減され、赤色及び緑色が青色と同程度の明度をもつように修正された。

視覚的な特徴としては、補正後の画像では沈船上のいたるところで人工物とみられる円筒形の物体の累積が明瞭に認められる。とりわけ画像の周縁部において視覚的情報が増したことがわかる。また各所には反射光の強い箇所が存在しており、それらはテヅルモヅルの 1 種に似た、30-50 cm

ほどの生物と思しき物体であることが見て取れる。画像の上半分においては、体長 10-30 cm ほどの魚が群をなす様子も明瞭に捉えられていることが確認できる。

4.4 モザイクング用データセットの抽出

コントラストに乏しい画像が多く、沈船上以外で撮影された画像ではモザイクングが困難であることから、以降の処理にあたっては沈船の周辺で撮影された計 230 枚の画像のみを用いた。撮影地点を Fig. 7 に示す。位置は INS での推定値にカメラの取付オフセットを加えたものであり、色分けは測線航走のセット数に対応している。第 3 セットの一部測線では沈船の東側で AUV の前方障害物検知ソナーが反応する事象があり、回避行動をとった結果として航跡が湾曲している。また、このデータセットの撮影高度は概ね 8-10 m である。

4.5 撮影位置誤差の確認

前節で抽出したデータセットから、顕著な被写体が写っているものを 7 枚選出し、3.2.2. 節で述べた方法で海底面に投影した。結果を Fig. 8 (a)

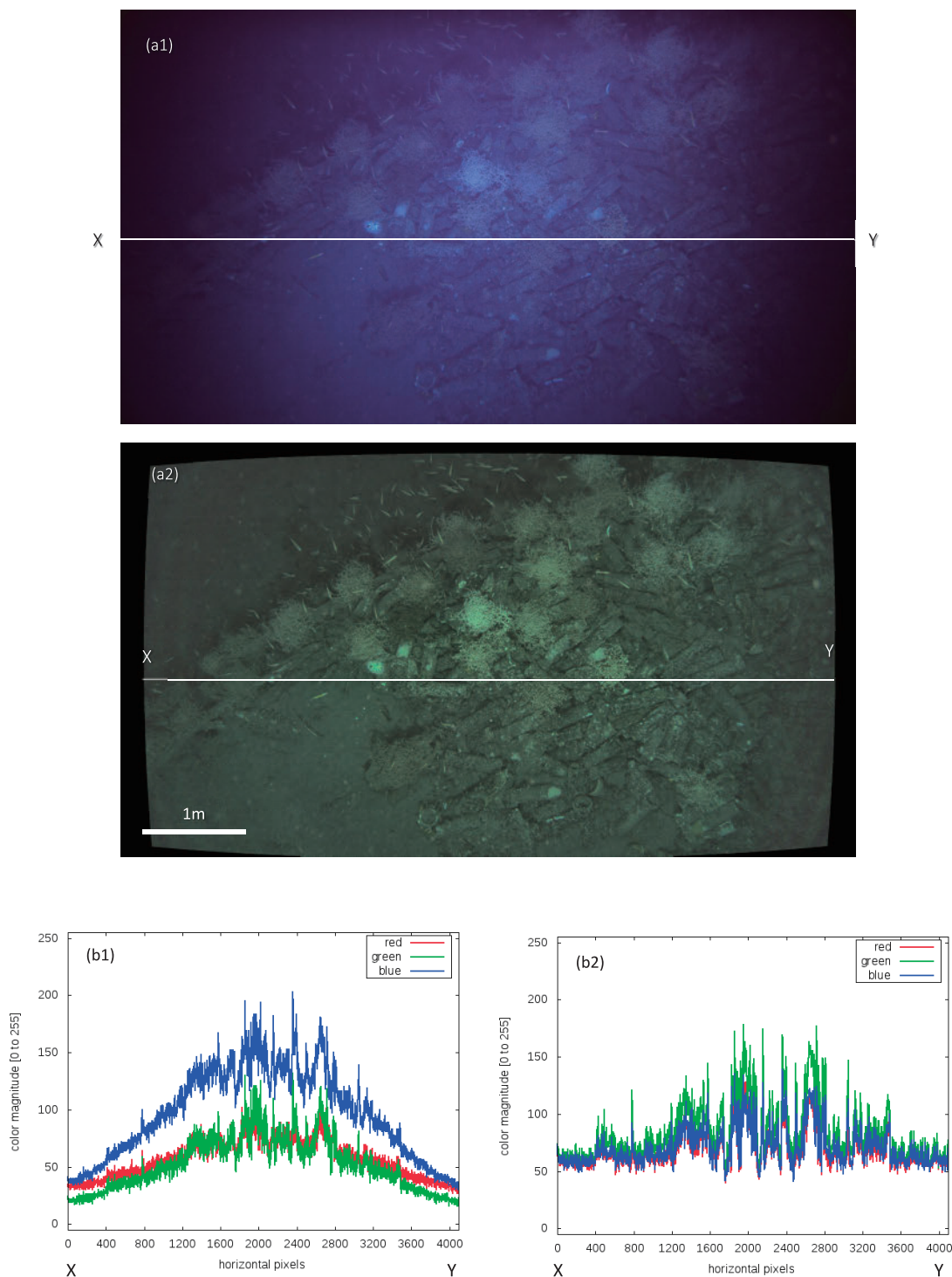


Fig. 6. (a1) Original image taken above the shipwreck at the altitude of 8.7 m. (a2) Illumination-corrected image of (a1). The correction algorithm was implemented, referencing the mask image of Fig. 5 (a). The automatic color correction reduced the bluish tone of the original image. Lens distortion was calibrated by calculating the horizontal scale on the image assuming that the imaging sensor was parallel to the seafloor. (b1) and (b2) represent RGB brightness values of pixels on the line X-Y in the images (a1) and (a2), respectively.

図 6. (a1) 沈船上で高度 8.7 m から撮影された画像。各種処理は施していない。(a2) は (a1) にレンズ歪補正、輝度補正及び色調補正を施した画像。マスク画像には Fig. 5 (a) を用い、色調についても青色を減少させるように自動的に補正された。水平スケールについてはカメラの像面と海底面が互いに平行であると仮定して求めた。(b1), (b2) はそれぞれ (a1), (a2) の RGB 色空間における明度をプロットしている。いずれも画像中に示した線分 X-Y 上のピクセルがもつ値。

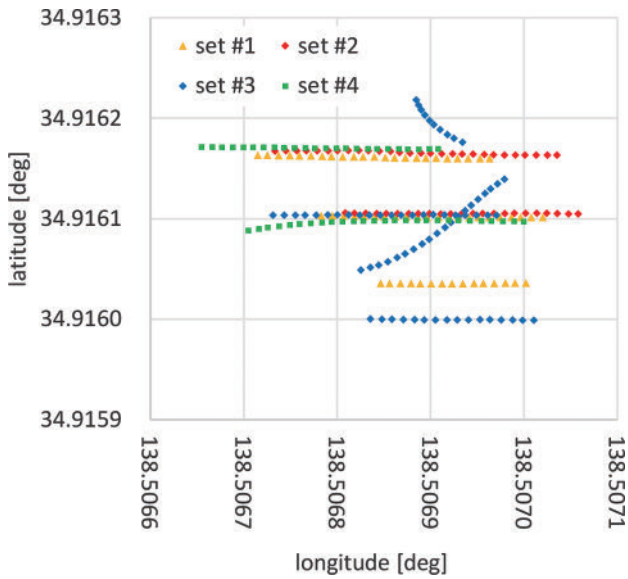


Fig. 7. Locations where the 230 images used for photomosaic making were shot. Location coordinates include the horizontal offset of the camera mount added to INS-based AUV locations. Note the error ranges contained in positioning.

図 7. モザイク作成用に選定された 230 枚の画像の撮影地点. 位置は INS の推定値にカメラ取付位置の水平オフセット量を足したもので、INS 由来の位置のため、誤差を伴っていることに注意を要する。

に示す. 図中の四辺形は、海底面に投影された撮像領域の四隅を直線で繋いだものである. 位置の比較に用いた被写体は Fig. 8 (b), (c) に示すとおりであり, それぞれ人工物と思われる物体の特徴的な一点を選出した. それら被写体の海底面上での位置を Fig. 8 (a) 中にプロットしている. プロットの様子から, 各セット間で数 m オーダに及ぶ誤差が生じていることが読み取れる. セット 1 と 2 の間の系統的とみられる位置ずれは, 主に DVL が海底を捕捉できなかった期間に生じたものと思われる. 一方で, セット 2 以降には数 m レベルの系統的ではない誤差が現れており, DVL による対地速度補償の下であっても機器の性能限界による位置推定誤差が無視できないレベルにあると考えられる. 位置誤差が系統的なものだけではないために, 本稿では当該誤差の補正を行わずにモザイクを試みた.

4.6 オルソモザイク結果

作成したオルソモザイクを Fig. 9 に示す. 230 枚の画像のうち 113 枚がアラインメントに適用された. 視覚的な整合性は図中の中央及び南側の領域で比較的良好であるものの, 北側では沈船の東縁が西側へ大きく移動しており不整合が目立つ. モザイク内の領域における画像の重複度は Fig. 10 に示すとおりである. 中心部での重複度の高さは, 同一の海底面を写した画像が複数の測線間で存在することによる. 南側及び北側では対照的に, 測線間の重複が比較的少なく単一の測線で取得した画像群からの寄与が支配的だったものと考えられる. モザイクを構成する各画像がもつ位置誤差については, Agisoft PhotoScan による推定値を Fig. 11 に示した. Fig. 8 で示したとおり測線航走の各セット間で INS 由来の位置に数 m オーダの差が生じており, アラインメントの過程で数 m に及ぶ画像の水平移動を要したことが確認できる.

5 高度化に向けた考察

沈船を写した画像であっても, 本稿で述べた処理手法を採用するうえでは必ずしも十分な品質を確保できず, 作成されたモザイクは視覚的な不整合を伴っていた. 取得画像の輝度及びコントラストの向上, 並びにモザイク作成精度の向上にむけて, AUV「ごんどう」を用いた今後の光学観測において検討すべき事柄について考察する.

5.1 位置誤差と画像のアラインメント精度

同一の測線上を繰り返し航走したため, 経時的に蓄積する AUV の位置誤差が目立った. Fig. 8 で簡易的に示したとおり, 撮影された画像は数 m オーダの位置誤差を伴っており, これは Fig. 11 における画像の水平誤差量としても現れている.

沈船の北側に生じたモザイクの不整合は AUV の位置誤差に起因する. しかし, Fig. 11 において北側の 2 本の測線で撮影された画像は水平誤差量が比較的小さい. 即ち, アラインメントの過程

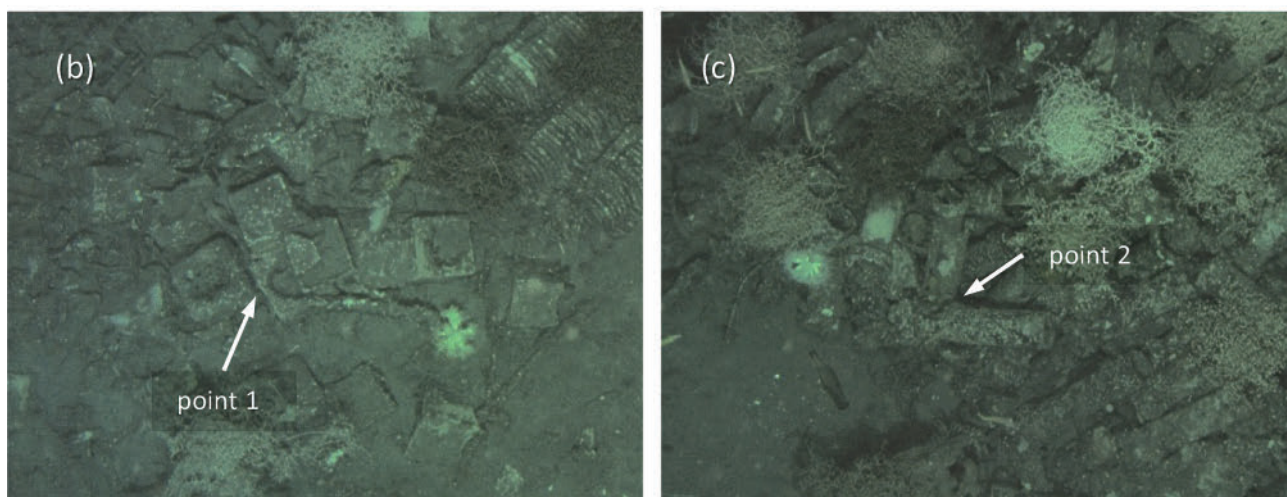
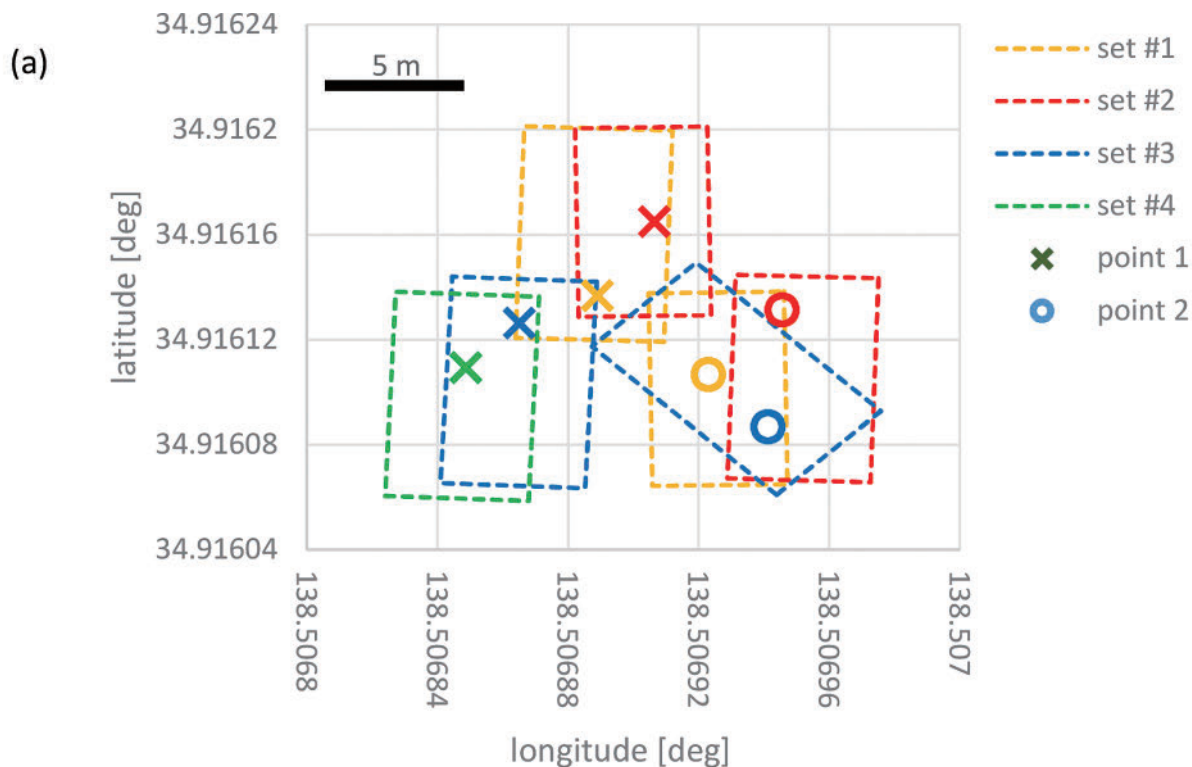


Fig. 8. (a) Locations where 7 images were projected on the seafloor to evaluate positioning errors. The rectangles correspond to areas each image was photographed. Crosses and circles indicate feature points that are common in each image.

(b), (c) The arrows indicate the two specific points in each image marked by crosses and circles.

図 8. (a) AUV の位置の誤差を確認するために海底面に投影された 7 枚の画像の位置. 四辺形はそれぞれ画像の撮像領域に対応する. バツ印及び丸印はそれぞれの画像に共通する特徴点の位置.

(b), (c) バツ印及び丸印に対応する特徴点を矢印で指している.

を経ても位置誤差が修正されず、画像は所与の位置に留まったことが示唆される。この 2 本の測線はセット 1 及びセット 4 に対応し、Fig. 8 から読み取ると両測線の間には水平方向に 4–5 m 程度の相違が存在する可能性がある。そこでセット 4

で撮影された画像を東側へ一様に 5 m 移動させ、再度アラインメント及びモザイク作成を試みた。結果を Fig. 12 に示す。作成されたモザイクには Fig. 9 からの改善はみられず、北側には不整合が残った。Fig. 12 (b) に示した水平誤差図からは、

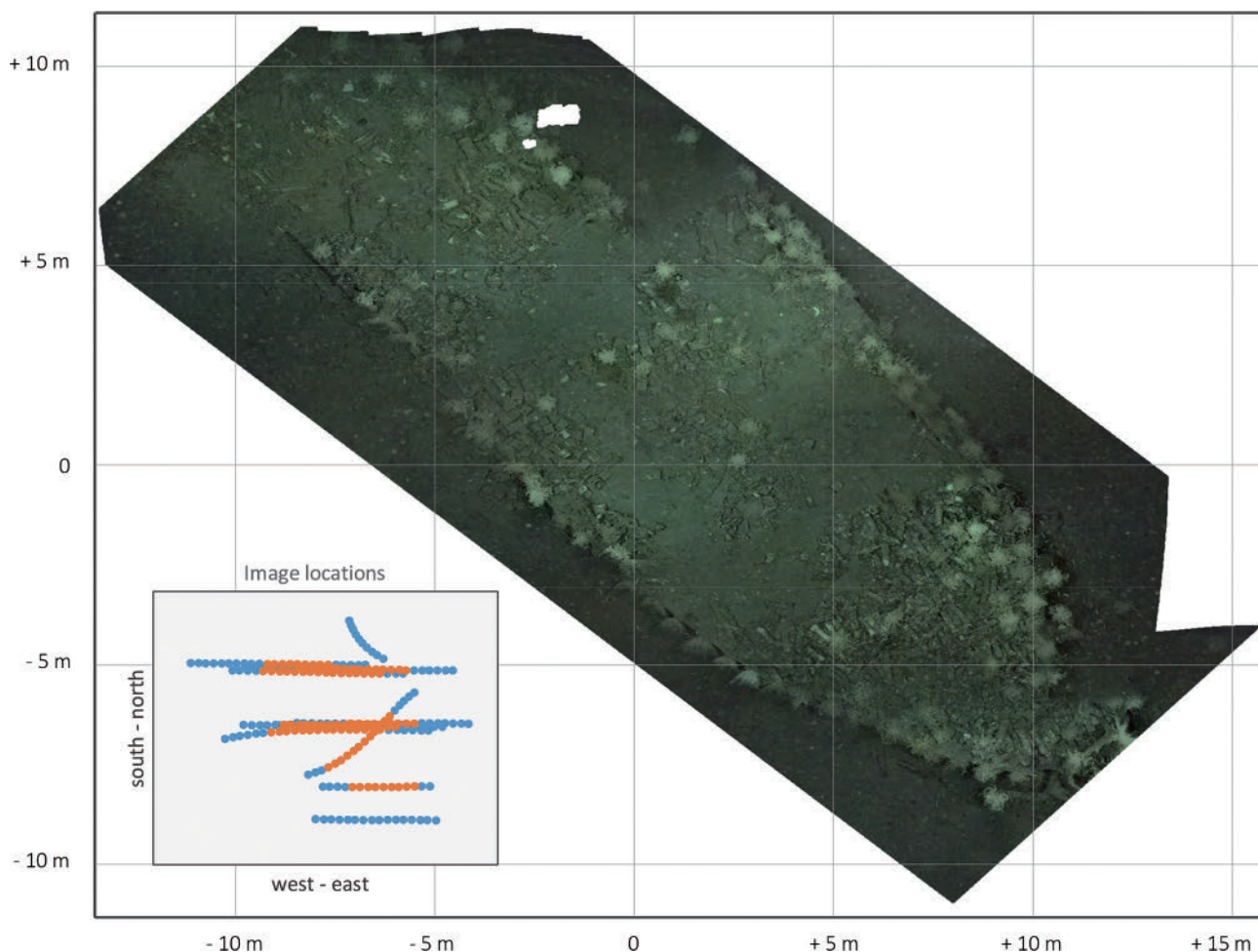


Fig. 9. Photomosaic of the shipwreck and horizontal locations of images used for photomosaic making. Out of the 230 images, 113 contributed to the alignment, and their photographing positions are indicated with orange-colored dots.

図 9. 沈船のモザイク画像とモザイク作成の処理にかけられた 230 枚の画像の位置. 230 枚のうち、アラインメントに寄与した 113 枚の画像の撮影位置を橙色で示している.

セット 4 の画像を整合させる方向が変化したことによって誤差楕円の向きが変化しており、Fig. 9 と同様の状態に向かって画像の整合が行われていることが読み取れる。このことから、当該ソフトウェアの自動整合アルゴリズムでは、数 m 程度の初期位置誤差であれば視覚的な整合性を優先して位置を修正することがわかる。またこの点で、本稿におけるデータセットでは視覚的情報が不十分であったことが示唆される。

調査範囲が広大になるほどに航行距離が伸び、INS/DVL 航法による位置推定の確度は調査開始から終了までの間に大きく低下する。誤差の蓄積を極力低減させるための初歩的な方策として、AUV のピッチ変化が極力小さくなるような調査

計画を立案し、DVL の検知範囲から海底面が外れるような事態を防ぐことが求められる。また、今回の調査のように平行な測線のみからなる場合は、重複する領域の画像間に相対位置誤差を溜めないように、隣接する測線を順番に消化していくことが最良であると考えられる。

なお、数 m オーダの位置誤差は現在の海上保安庁の音響機器による海底地形調査では修正できるレベルになく、測量船による測得水深を参照した水平誤差修正（藤沢・瀬尾，2016，長澤・他，2018）及び USBL 音響測位を活用しても、位置精度を 10 m オーダより劇的に改善することは困難であるのが現状である。視覚的整合性を重視する限り、モザイク内の被写体どうしで位置関係が

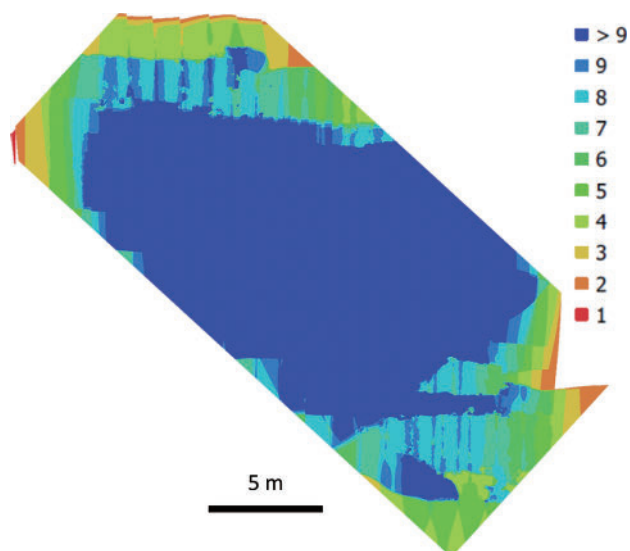


Fig. 10. Degree of image overlap in Fig. 9. The number of overlapping images in each point of the photomosaic is indicated by color scale.

図 10. Fig. 9 のモザイクにおける画像の重複度. 色はその地点におけるアラインメント済み画像の重複数を示している.

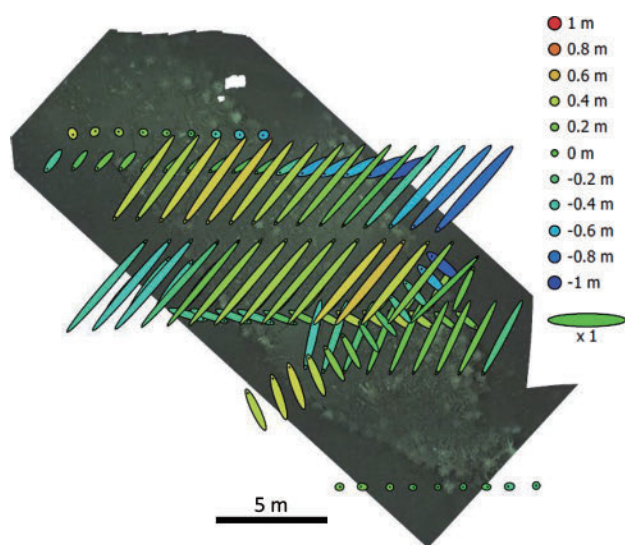


Fig. 11. Positioning errors of the aligned images, estimated by the software Agisoft PhotoScan. Vertical factor of error is represented by the color of the ellipses, whereas horizontal error factors by their sizes. Estimated locations of images are marked with black dots inside of each ellipse.

図 11. ソフトウェア Agisoft PhotoScan によって推定されたアラインメント済み画像の位置誤差. 誤差の鉛直成分を楕円の色で、水平成分を楕円の形状でそれぞれ示している. アラインメント後の画像の位置は誤差楕円内に黒点として表している.

歪むことはなくとも、そのモザイクの地理情報については音響測位の精度に留まる. 反対に、もし位置が高精度に決定されているような海底の構造物を撮影することが出来れば、AUV の位置誤差の推定に役立つであろう.

5.2 合焦方式による差異

2.3.2 項で述べた 3 種類の合焦方式について写り方を比較したところ、マニュアルフォーカス及びアクティブ方式のオートフォーカスで撮影した画像には視覚的差異は認められなかった. パッシブ方式のオートフォーカスで撮影した画像の例を Fig. 13 (a) 及び (b) に示す. 2 枚の画像は約 0.6 秒の間隔で撮影された連続する画像であるが、(a) で明瞭に写っている沈船上の被写体は (b) では鮮明さを失い、代わりに海中の浮遊物質とみられる白い粒子状の対象物に焦点を合わせている. とりわけ本稿の調査では、カメラから海底までの間が比較的長距離であることから光の減衰に加えて懸濁物質による後方散乱の影響も多大 (Bonin et al., 2011) であると考えられ、パッシブ方式のオートフォーカスでは海底面よりも散乱光に反応して合焦する可能性が高い. マニュアルフォーカスはその点では確実性をもつが、AUV の姿勢や高度が変化しても被写体までの距離が被写界深度に含まれていなければならない. 測線航行中は DVL からの高度データが概ね継続的に取得できること、及び高度変化に対して合焦の調整が概ね追従できているとみられたことから、アクティブ方式のオートフォーカスが最も実用的な設定であると考えられる.

5.3 調査高度及び撮影パラメータの設定

調査高度を下げることで、カメラレンズに入射する光が通過しなければならない海水の光学的な厚みが減ずる. 海水中を伝播する光は水による吸収のほか懸濁物質による散乱の影響を受け、後方散乱を受けた光がレンズに入射することも被写体のコントラストを著しく損ねる要因となる (Bonin et al., 2011). 一方で、安全を確保し効率

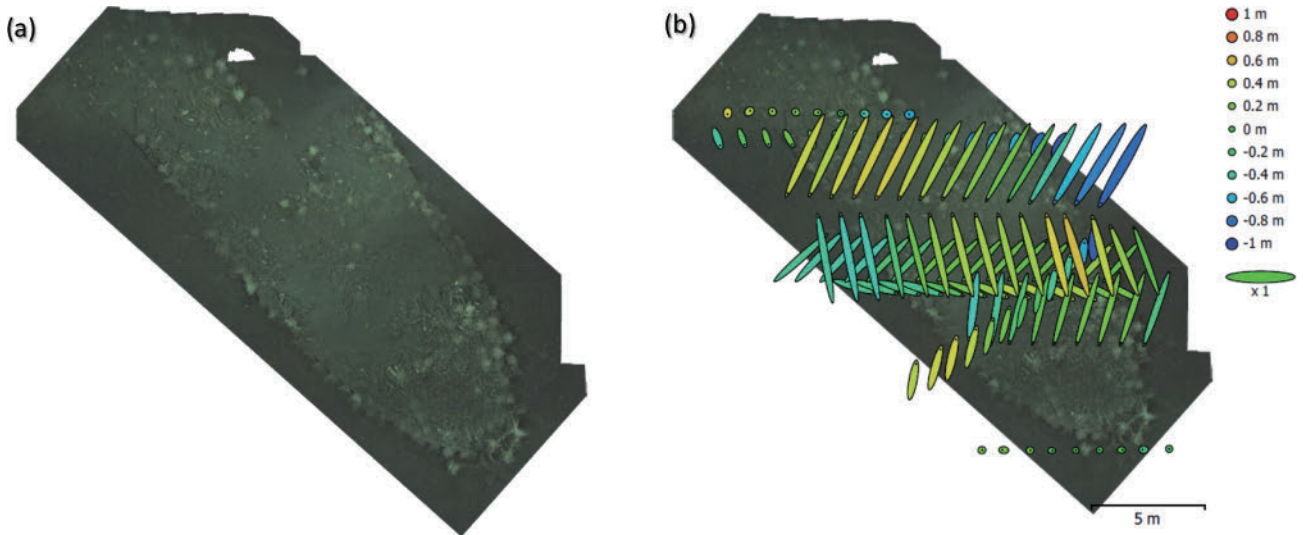


Fig. 12. (a) Photomosaic of the shipwreck, alignment processed with the locations of the set #4 images uniformly shifted 5 m eastward from the initial position. (b) Estimated values of positioning errors in the aligned images. Vertical error is represented by the color of the ellipse, and horizontal errors with its size. Estimated locations of the images are marked with black dots inside of each ellipse.

図 12. (a) 沈船のモザイク画像。セット 4 の撮影データのみ東へ様に 5 m 移動させてからアラインメント処理を行った。(b) アラインメント済み画像が有する位置誤差の推定値。誤差の鉛直成分を楕円の色で、水平成分を楕円の形状でそれぞれ示している。アラインメント後の画像の位置は誤差楕円内に黒点として表している。

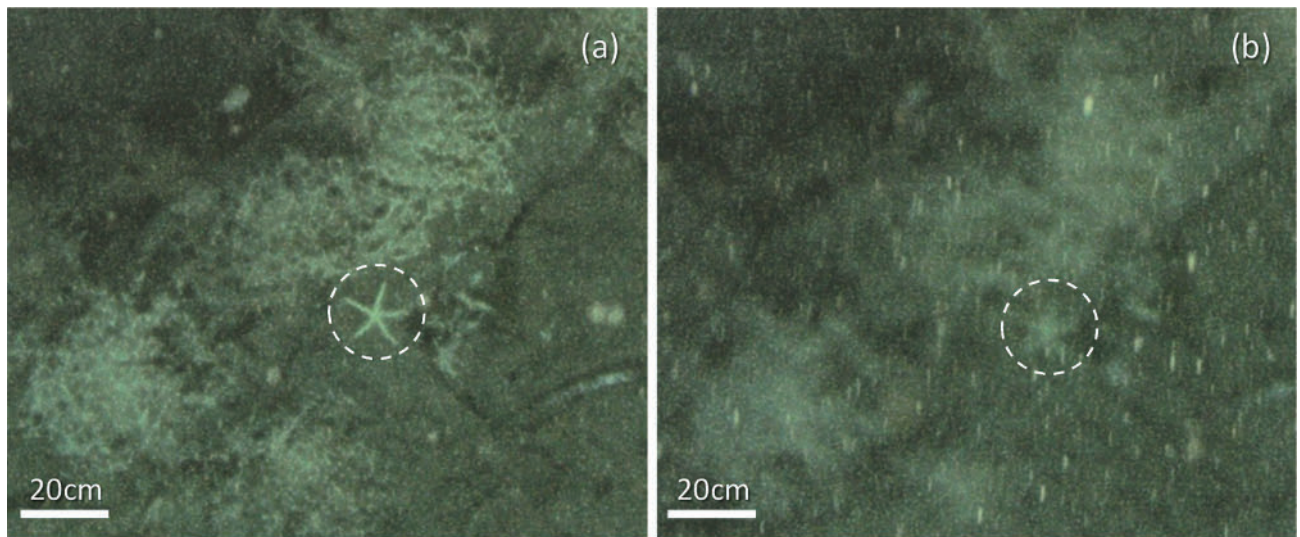


Fig. 13. Images showing a part of the shipwreck, captured with the passive autofocus. The image (b) was obtained approximately 0.6 seconds after the image (a) under the same setting. The dashed circles in each image indicate what seems to be the same starfish. Focusing length of the image (b) seems to be shorter than the observation altitude, causing suspended matters in water to be captured sharply, whereas the starfish on the shipwreck is out of focus.

図 13. パッシブ方式のオートフォーカスによって撮影された沈船の一部。(b) は (a) の約 0.6 秒後に同一の設定のもとで撮影された画像であり、破線の丸囲いでヒトデと思いき共通の被写体を示している。(b) は (a) に比べて海水中の懸濁物質からの反射が目立つ反面、沈船上の物体はぼやけている。

的に調査を実施するには、高度を極力高く保つことにメリットが存在する。本海域では濁度による制約が大きく8-10 m程度の調査高度では無理があるといえるだろうが、今後の調査において高度設定を工夫し、写り方の違いについて検証を行う必要がある。

また、撮影時の各種パラメータは試験的な設定としたが、今後調整すべき項目は複数存在する。露光時間、ホワイトバランスは輝度や色調を通じて画像の品質に大きく影響する。またF値は被写界深度及び輝度の空間的不均一についても左右することから、比較検証が必要であろう。

5.4 輝度補正及び色調補正の手法

水中画像から海水による光の減衰の影響を低減させ、より被写体を鮮明にする手法については、数多くの研究例が存在する。ソフトウェアベースの手法としては、大別して散乱光による影響を除去する dehazing と呼ばれる手法及び水による長波長成分の吸収を補正する手法の2種類があり、光の伝播についての物理モデルに基づくものの他、ヒストグラム平坦化等を活用するなど物理モデルを背景としない手法、その他に統計的学習や光の減衰に関する逆計算によって色復元を行うもの等が存在する (Lu et al., 2017)。また、数ある色調補正の手法を比較し、その有用性を論じた文献も存在する。例えば Mangeruga et al. (2018) は、濁度や水深の異なる4海域で撮影したカラー画像に、複数種類の色調補正アルゴリズムを施して定量的に比較している。今後、取得画像のより鮮明な輝度補正及び色調補正を追求するならば、これら先行研究の成果である各種アルゴリズムを試行することは一考に値する。

5.5 モザイク手法

本稿では簡便かつ恣意的でない画像処理手法を求めて市販ソフトウェアを使用し、アラインメントはすべてソフトウェアの標準的なプロセスで自動的に行うこととした。Agisoft PhotoScan ではオルソモザイクに不整合が生じた場合の補助機能

として、整合されるべき個別の被写体にマーカを設定することができる (Agisoft LLC, 2018)。本稿のデータセットでは共通の特徴点の抽出が困難であるため実施を見送ったが、解析者個人の視覚的判断に基づく微調整は今後確認すべき事項である。

なお、水中画像に特化したオルソモザイク手法については、種々の文献において言及されている。例えば Pizarro and Singh (2003)、及び巻・他 (2011) では、画像に写った特徴的な対象物を抽出し、複数の画像間でその特徴点をマッチングしていくアルゴリズムが提案された。良質なデータが取得できてさえいれば本稿で採用した市販ソフトウェアによる手法で問題を生じないのか、もしくは先行研究を参照してさらに高度化する必要があるのか、データセットに乏しい現状では判断できないものの、重要な論点には違いないだろう。

6 むすび

本稿では、AUV「ごんどう」に新規搭載された光学観測機器の運用試験の結果を報告した。試験的に実施した今回の調査であってもオルソモザイクを作成できたことから、沈船のような局所的な対象物については機器が有効に機能することが認められた。今後の課題は、特徴的な被写体に乏しい海底面であっても対象を判別できる画像を取得することである。濁度の異なる海域での調査を試行し、潜航ミッションの設計にも工夫を施すなどして、高精度なモザイク画像の量産に向けた模索を続けていく。

A 付録 幾何光学に関する諸事項

A.1 被写界深度

収差等の影響がない理想的な光学系をもつカメラを仮定すると、点光源から発せられてレンズに入射した光は、合焦の場合を除いて像面上で点像にはならず、円形の像となる。この円は錯乱円 (circle of confusion) と呼ばれる。錯乱円の直径が十分小さく点像と区別がつかなければ、厳密な

意味で合焦の状態にない被写体であっても、合焦と見なすことはできる。このとき、許容できる最大の錯乱円を許容錯乱円と呼ぶ。このように、完全に合焦の状態にある被写体の前後にも、合焦であるように見える範囲が存在する。この範囲を被写界深度 (DOF : depth of focus) と呼ぶ (岸川, 1990)。

被写界深度の計算には、被写界深度の後端が無制限遠となるときの、像面から被写体までの距離を意味する過焦点距離 (hyperfocal distance) が用いられる。過焦点距離を H で表し。レンズの焦点距離を f 、F 値を N 、及び許容錯乱円の直径を c とすれば

$$H = f + \frac{f^2}{Nc}$$

と計算される。なお、式の導出には収差等の影響がない理想的な光学系を仮定し、幾何光学のレンズの結像式 (青木, 2002 など) を用いた。被写界深度の前端及び後端からレンズの主点までの距離をそれぞれ D_N 、 D_F とし、被写体からレンズの主点までの距離を D と置くと、被写界深度 H を用いて

$$D - D_N = D - \frac{D(H-f)}{H+D-2f} \approx \frac{D^2}{H+D}$$

$$D_F - D = \frac{D(H-f)}{H-D} - D \approx \frac{D^2}{H-D}$$

とそれぞれ計算される。両式の最右辺は焦点距離が過焦点距離に比べて小さいことを考慮し、 $f/H \rightarrow 0$ の近似をとったものである。本稿では、許容錯乱円としてカメラの撮像素子のピクセルサイズを代入し、上の近似式を用いて被写界深度を見積もった。

A.2 カメラキャリブレーション

Brown のレンズ歪モデル (Brown, 1966) は、レンズの光軸中心を原点として半径方向及び円周方向の歪みを無限級数によってそれぞれ近似するものである。本稿で使用したのは、光軸中心を原点とする投影面上の歪曲した座標 (x, y) を歪曲のない座標 (x', y') に変換する以下の多項式近似

(Agisoft LLC, 2018) である。

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = (1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 + k_4 r^8) \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + (1 + p_3 r^2 + p_4 r^4) \begin{pmatrix} p_1(r^2 + 2x^2) + 2p_2 xy \\ p_2(r^2 + 2y^2) + 2p_1 xy \end{pmatrix}$$

ここで $r^2 = x^2 + y^2$ であり、係数 k_n 、 p_n はそれぞれ半径方向及び円周方向の歪みを決定するパラメータである。Agisoft PhotoScan では上式に加えて、レンズと撮像素子のアラインメントずれ等を表す次の座標変換式を実装する (Agisoft LLC, 2018)。

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = 0.5 \begin{pmatrix} h \\ w \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} c_x \\ c_y \end{pmatrix} + f \begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_1 x' + b_2 y' \\ 0 \end{pmatrix}$$

ここで h 、 w はそれぞれ画素数で測った画像の高さと幅であり、 c_x 、 c_y はレンズの光軸中心と撮像素子の中心とのオフセットを表す量である。 b_1 、 b_2 はそれぞれ affinity 及び non-orthogonality と説明されている。本稿においては、上記の各種パラメータのうちカメラの製造元から提供された k_1 、 k_2 、 k_3 、 p_1 、 p_2 、 f 、 c_x 、 c_y については光学系固有の値を適用し、それ以外の k_4 、 p_3 、 p_4 、 b_1 、 b_2 はすべてゼロとした。

謝 辞

測量船「拓洋」船長ならびに乗組員の皆様には、安全かつ安定的な海洋調査の実現に日頃から格別のご配慮を賜り、細心の注意をもって調査を遂行してくださいました。心より感謝申し上げます。そして、AUV「ごんどう」運用方法の確立にご尽力され、今日の調査の礎を築いてくださった歴代の AUV 担当職員の皆様に対し、ここに感謝の意を表します。

文 献

- Agisoft LLC (2018) Agisoft PhotoScan User Manual: Professional Edition Version 1.4, http://www.agisoft.com/pdf/photoscan-pro_1_4_en.pdf.
- Allotta, B., R. Costanzi, A. Ridolfi, C. Colombo, F. Bellavia, M. Fanfani, F. Pazzaglia, O. Salvetti,

- D. Moroni, M. A. Pascali, M. Reggiannini, M. Kruusmaa, T. Salumäe, G. Frost, N. Tsiogkas, D. M. Lane, M. Cocco, L. Gualdesi, D. Roig, H. T. Gündogdu, E. I. Tekdemir, M. I. C. Dede, S. Baines, F. Agneto, P. Selvaggio, S. Tusa, S. Zangara, U. Dresen, P. Lätti, T. Saar, and W. Daviddi (2015) The ARROWS project: adapting and developing robotics technologies for underwater archaeology, *IFAC Papers Online*, 48-2, 194-199. doi: 10.1016/j.ifacol.2015.06.032.
- 青木貞雄 (2002) 光学入門, 182pp, 共立出版, 東京.
- Bonin, F., A. Burguera, and G. Oliver (2011) Imaging Systems for Advanced Underwater Vehicles, *Journal of Maritime Research*, 8 [1], 65-86.
- Brown, D. C. (1966) Decentering Distortion of Lenses, *Photogrammetric Engineering*, 32 [3], 444-462.
- Cathx Ocean Ltd. (2017) Cathx Flat Field Overview, private report, Cathx Ocean Ltd., Naas, Kildare.
- Drap, P., J. Seinturier, B. Hijazi, D. Merad, J. Boi, B. Chemisky, E. Seguin, and L. Long (2015) The ROV 3D Project: Deep-Sea Underwater Survey Using Photogrammetry. *Applications for Underwater Archaeology*, *ACM Journal on Computing and Cultural Heritage*, 8 [4], 1-24. doi: 10.1145/2757283.
- Durden, J. M., T. Schoening, F. Althaus, A. Friedman, R. Garcia, A. G. Glover, J. Greinert, N. J. Stout, D. O. B. Jones, A. Jordt, J. W. Kaeli, K. Köser, L. A. Kuhn, D. Lindsay, K. J. Morris, T. W. Nattkemper, J. Osterloff, H. A. Ruhl, H. Singh, M. Tran, and B. J. Bett (2016) Perspectives in Visual Imaging for Marine Biology and Ecology: From Acquisition to Understanding, *Oceanography and Marine Biology: An Annual Review*, 54, 1-72.
- von Fock, S. M. T. S., S. Bilich, K. Davis, V. K. Viswanathan, Z. Lobo, J. Lupanow, C. Clark, T. Gambin, and Z. Wood (2017) Pipeline for Reconstruction and Visualization of Underwater Archaeology Sites using Photogrammetry, 32nd International Conference on Computers and their Applications.
- 藤沢美幸・瀬尾徳常 (2016) AUV「ごんどう」で取得した海底地形データの位置補正プログラムの作成, 平成 27 年度海洋情報部研究成果発表会要旨集.
- Guo, T., A. Capra, M. Troyer, A. Gruen, A. J. Brooks, J. L. Hench, R. J. Schmitt, S. J. Holbrook, and M. Dubbini (2016) Accuracy Assessment of Underwater Photogrammetric Three Dimensional Modelling for Coral Reefs, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLI-B5, 821-828, XXIII ISPRS Congress, 12-19 July 2016, Prague. doi: 10.5194/isprsarchives-XLI-B5-821-2016.
- Jaffe, J. S. (1990) Computer modeling and the design of optimal underwater imaging systems, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 15 (2), 101-111.
- 岸川利郎 (1990) ユーザーエンジニアのための光学入門, 330pp, オプトロニクス社, 東京.
- 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.
- Lu, H., Y. Li, Y. Zhang, M. Chen, S. Serikawa, and H. Kim (2017) Underwater optical image processing: a comprehensive review, *Mobile Networks and Applications*, 22, 1204-1211. doi: 10.1007/s11036-017-0863-4.
- 巻 俊宏 (2015) 海中ロボットと地図, *日本ロボット学会誌*, 33, [10], 766-772.
- 巻 俊宏・浦 環・Hanumant Singh・坂巻 隆

- (2011) 自律型水中ロボットによる鹿児島湾たぎり噴気帯の3次元画像マッピング(第3報) —測位情報と視覚的特徴の併用による画像モザイク手法—, 海洋調査技術, 23(1), 1-10.
- 巻 俊宏・松田匠未・久米絢佳・佐藤芳紀・坂巻隆・浦 環 (2012) 複雑な海底環境の画像観測用 AUV「Tri-TON」の開発, 第23回海洋工学シンポジウム講演要旨集, OES23-047.
- Mangeruga, M., M. Cozza, and F. Bruno (2018) Evaluation of Underwater Image Enhancement Algorithms under Different Environmental Conditions, *Journal of Marine Science and Engineering*, 6 [1], 10. doi: 10.3390/jmse6010010.
- Minami, H. and Y. Ohara (2016) Detailed Morphology and Bubble Plumes of Daiichi-Amami Knoll in the Central Ryukyu Arc, *Marine Geology*, 373, 55-63. doi: 10.1016/j.margeo.2016.01.008
- Minami, H. and Y. Ohara (2017) The Gondou hydrothermal field in the Ryukyu Arc: A huge hydrothermal system on the flank of a caldera volcano, *Geochem. Geophys. Geosyst*, 18, 3489-3516. doi: 10.1002/2017GC006868.
- Minami, H. and Y. Ohara (2018) Detailed volcanic morphology of Daisan-Miyako Knoll in the southern Ryukyu Arc, *Marine Geology*, 404, 97-110. doi: 10.1016/j.margeo.2018.07.008.
- Morris, K. J., B. J. Bett, J. M. Durden, V. A. I. Huvenne, R. Milligan, D. O. B. Jones, S. McPhail, K. Robert, D. M. Bailey, and H. A. Ruhl (2014) A new method for ecological surveying of the abyss using autonomous underwater vehicle photography, *Limnol. Oceanogr.: Methods*, 12, 795-809.
- 長澤亮佑・田中喜年・瀬尾徳常・松野美幸・齊藤康仁・南 宏樹 (2018) AUV「ごんどう」を用いた久米島沖の高分解能海底火山地形調査, 海洋情報部研究報告, 56, 59-67.
- Pizarro, O. and H. Singh (2003) Toward large-area mosaicing for underwater scientific applications, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 28, [4], 651-672. doi: 10.1109/JOE.2003.819154.
- Roman, C. N. and I. R. Mather (2010) Autonomous Underwater Vehicles as Tools for Deep-Submergence Archaeology, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 224 (4), 327-340.
- Sankpal, S. S. and S. S. Deshpande (2016) Nonuniform Illumination Correction Algorithm for Underwater Images Using Maximum Likelihood Estimation Method, *Journal of Engineering*, Hindawi Publishing Corporation, volume 2016, doi:10.1155/2016/5718297.
- 篠野雅彦・瀬田剛広・岡本章裕・稲葉祥梧 (2018) ホバリング型 AUV「ほぼりん」の開発状況, 平成30年度(第18回)国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 海上技術安全研究所 研究発表会講演集, A1-4.
- Singh, H., A. Can, R. Eustice, S. Lerner, N. McPhee, and C. Roman (2004) Seabed AUV offers new platform for high-resolution imaging, *Eos Trans. AGU*, 85 [31], 289, 294-295.
- Wakefield, W. W. and A. Genin (1987) The use of a Canadian (perspective) grid in deep-sea photography, *Deep-Sea Research*, 34, [3], 469-478.
- Wynn, R. B., V. A. I. Huvenne, T. P. Le Bas, B. J. Murton, D. P. Connelly, B. J. Bett, H. A. Ruhl, K. J. Morris, J. Peakall, D. R. Parsons, E. J. Sumner, S. E. Darby, R. M. Dorrell, and J. E. Hunt (2014) Autonomous Underwater Vehicles (AUVs): Their past, present and future contributions to the advancement of marine geoscience, *Marine Geology*, 352, 451-468.

山田康人・浦 環・ソートン ブレア・能勢義
昭・坂巻 隆 (2009) クラゲの認識・追跡・
捕獲を行う自律型ロボットの研究開発, 生産
研究, 61, [4], 789-792.

Yoerger, D. R., A. M. Bradley, M. Jakuba, M. A.
Tivey, C. R. German, T. M. Shank and R. W.
Embley (2007) Mid-Ocean Ridge Exploration
with an Autonomous Underwater Vehicle,
Oceanography, 20, [4], 52-61.

要 旨

AUV「ごんどう」を使用した実海域における
光学観測試験の結果を報告する。駿河湾において
海底上 8-10 m の高度から画像撮影を行い、海
域に存在する沈船のオルソモザイクングを試み
た。取得画像は総じてコントラストに乏しいもの
の、視覚的特徴が十分に顕著な画像群については
モザイクングが有効に機能すると確かめられた。