

## 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2報) —複数回の全自動潜航による広域画像マッピング—

巻 俊宏\*, 近藤 逸人\*\*, 浦 環\*, 坂巻 隆\*, 水島 隼人\*\*\*, 柳澤 政生\*\*\*

3D photo mosaicing of Tagiri shallow vent field  
by an autonomous underwater vehicle (2nd report)  
- Wide area visual mapping through multiple dives -

Toshihiro Maki\*, Hayato Kondo\*\*, Tamaki Ura\*, Takashi Sakamaki\*, Hayato Mizushima\*\*\* and Masao Yanagisawa\*\*\*

### ABSTRACT

The authors have proposed an innovative method to navigate an autonomous underwater vehicle (AUV) for visual mapping of seafloor with high positioning accuracy without using any vision-based matching. The proposed method was implemented in the AUV Tri-Dog 1 and sea experiments were carried out at Tagiri vent field, Kagoshima bay in Japan (Maki et al., 2008).

Based on the success of the experiments, a series of dives was carried out at the same place. The AUV Tri-Dog 1 succeeded in 12 fully autonomous dives with a total duration of 29 hours. The vehicle took 9,288 pictures of the seafloor, keeping the altitude of 1.2 m with a surge speed of 0.08 m/s. A photomosaic of the seafloor was created by mapping 7,289 pictures based on the real-time estimates of the AUV state, without any pictorial correlation. The distributions of detailed features such as tube-worm colonies and bacteria mats are clearly shown. The photomosaic covers around 3,000 square meters. To the knowledge of the authors, this is one of the largest underwater photomosaic ever reported. The mapping accuracy was estimated to be 0.3 to 0.8 m based on the comparison of the photo-mosaic between dives.

### 1. はじめに

鹿児島湾奥部、若尊カルデラの東側にある水深約100mの海丘の頂上付近では、海底から火山性のガスが吹き出し、サツマハオリムシを中心とする独自の生物群集が存在する。鹿児島湾たぎり噴気帯ハオリムシサイトである。本海域ではこれまでに遠隔操縦ロボット(Remotely Operated Vehicle, ROV)や有人潜水艇(Human Occupied Vehicle, HOV)を用いた観測がなされてきた(橋本ほか, 1995)。しかしながら噴気の影響により水中探査機の位置を精度よく求めることが困難であ

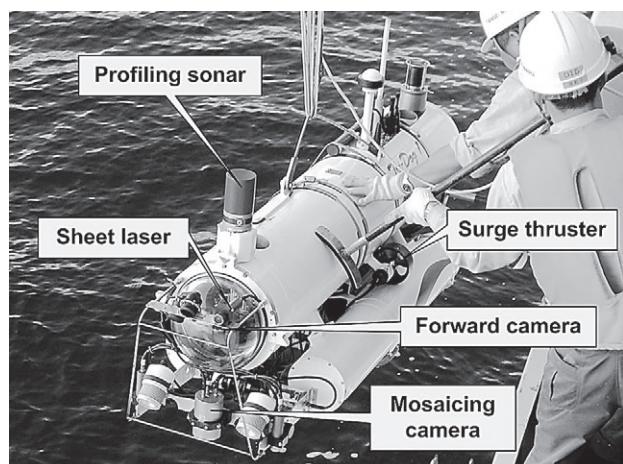


Fig. 1 AUV Tri-Dog 1 at the sea experiments.

+ 平成20年10月28日受付 平成21年3月20日受理  
\* 東京大学生産技術研究所 〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1  
Institute of Industrial Science, The University of Tokyo  
\*\* 東京海洋大学 〒135-8533 東京都江東区越中島2-1-6  
Tokyo University of Marine Science and Technology  
\*\*\* 早稲田大学 〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1  
Waseda University

Table 1 Specifications of the AUV Tri-Dog 1.

Vehicle	
Size	2.0m (L) × 0.9m (H) × 0.6m (W)
Mass	200 kg
Max. speed	0.7 m/s
Max. depth	110 m
Duration	4 hours
Actuators	100 W Thruster × 6
Power	NiCd 25.2 V 20 Ah × 4
Communication	Wireless LAN, Acoustic Modem
Processor (Main)	Intel Pentium M 1.1 GHz
Processor (Image processing)	Intel Pentium 4 2.4 GHz
OS	Microsoft Windows 2000
Sensor	
Velocity & Altitude	RDI Navigator 1200 kHz (DVL)
Depth	Druck PTX1830
Roll & Pitch	Crossbow AHRS 400MA
Heading	JAE JG-35FD (FOG)
Landmark search	Imagenex 881A Profiler 675 kHz
Obstacle search	Echo sounder × 6
Positioning (in air)	NovAtel RT-20 (GPS)
Positioning (underwater)	System Giken (SSBL)
Payload	
Forward camera	SONY EVI-D100
Downward camera	PGR Scorpion
High-resolution camera	Ricoh GR digital
Bathymetry camera	SONY XC555
Sheet laser	Crown CRGS-1015L60D × 3
Lighting	Arc lamp × 2, flash × 2

り、ハオリムシ群集の詳細な分布や形状には未だ明らかにされていない点が多い。

筆者らは海底噴気帯を精密観測するための自律型水中ロボット (Autonomous Underwater Vehicle, AUV) のナビゲーション手法を提案した (巻, 2008)。提案手法はプロファイリングソナー (指向性の強い音波で周囲スキャンを行うソナー、以後プロファイラーと呼ぶ) による自己位置とランドマーク地図の同時推定手法 (Maki et al., 2007b) を核とし、さらに発見したランドマークの位置・種類に基づきリアルタイムに観測経路を更新する手法 (Maki et al., 2007c)、および凹凸のある海底面を画像観測に適した低高度で追従するための位置制御手法 (Maki et al., 2007a) から構成されている。そして2007年3月に提案手法を実装したAUV Tri-Dog 1を用いて行われた実験により、ハオリムシサイトの海底面を約600平方メートルにわたって全自動で写真撮影し、画像マップを作成することに成功した (巻ほか, 2008)。

本稿は巻ほか (2008) の続編であり、2007年8月にハオリムシサイトにて再度行われた観測実験について報告する。2007年3月の実験では単一の潜航結果から画像マップを作成したが、提案手法 (以後、自律ナビゲーション手法と称す) を用いれば同一の人工ランドマークを基準とする複数回の観測結果を融合することが可能である。そこで今回は同一の人工ランドマークを用いて複数の全自動潜航を行い、各潜航で得られた画像マップをランドマーク位置を基準として貼り合わせることで広範囲の画像マッピングを行う。そしてハオリムシ群集やバクテリアマット等の分布状況を把握するとともに、潜航毎

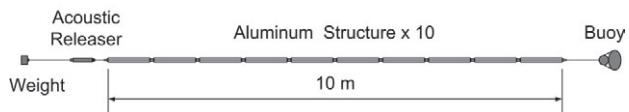


Fig. 2 Artificial landmark deployed to the experimental field. The reflector consists of 10 aluminum structures with cross-hair section.



Fig. 3 Deployment of the landmarks.

に得られた画像マップを比較することで精度検証を行う。さらに実験結果から判明した自律ナビゲーション手法の問題点について考察する。

## 2. 観測実験

観測実験は2007年8月16日～22日にかけて、鹿児島湾たぎり噴気帯ハオリムシサイトにて行われた。実験に使用したAUVおよびその展開方法については巻ほか (2008) (以後前回と称す) と同様であるため、本稿では概要を述べるに留める。

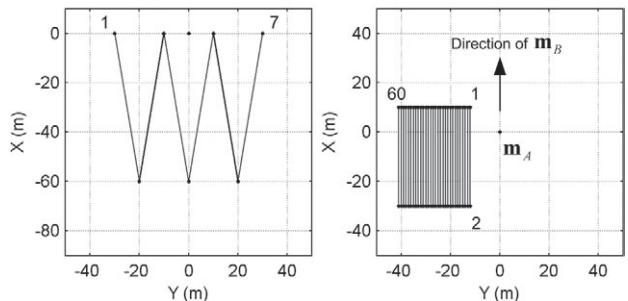
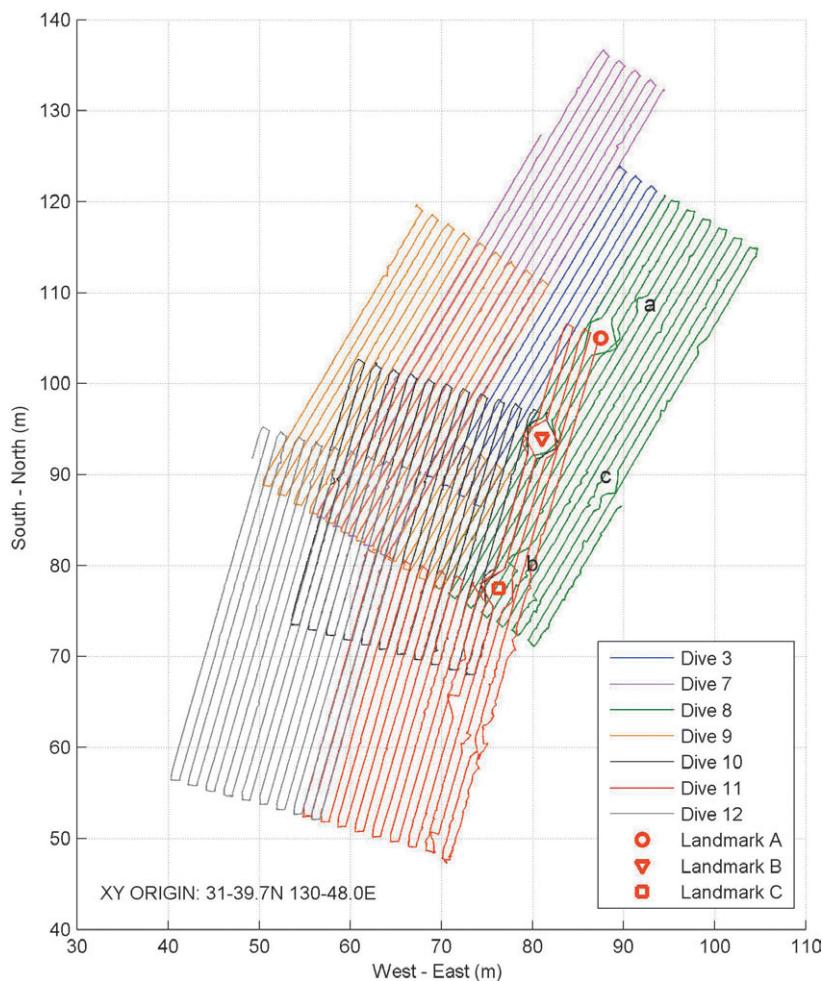
### 2-1. AUV Tri-Dog 1

AUV Tri-Dog 1 (トライドッグ1号) は1999年に東京大学生産技術研究所海中工学研究センターで開発されたホバリング型の自律型水中ロボットである (Kondo et al., 2001; 近藤, 2001)。写真を図1に、仕様を表1に示す。本機は実海域へ展開可能な頑健性を備えており、岩手県釜石湾口防波堤や琵琶湖における運用実績がある (Maki et al., 2006; 巷ほか, 2005)。以後、本稿ではTri-Dog 1をビーグルと呼ぶ。

ビーグルは航法センサとして対地速度及び高度を計測するドップラ式対地速度計 (Doppler Velocity Log, DVL)、ヨー角速度を計測する光ファイバジャイロ (Fiber Optical Gyro, FOG)、ロール・ピッチを計測する姿勢方位基準器 (Attitude Heading Reference System, AHRS)、水深計そしてプロファイラーを搭載している。これらのセンサ情報から自律ナビゲーション手法によって自身の位置・姿勢をリアルタイムに推定する。障害物センサとしては6台の音響レンジセンサを備えている。また、機体前方にはランドマークの種類識別用のシート

Table 2 Experimental parameters.

Operating frequency	5	Hz
Number of samples of the particle filter	200	
Max. range of the profiler	45.0	m
Waypoint radius	0.25	m
Max. surge velocity ( $W^1$ )	0.20	m/s
Max. surge velocity ( $W^2$ )	0.08	m/s
Max. sway velocity	0.05	m/s
Max. yaw angular velocity	20.0	deg/s
Reference altitude from the seafloor ( $W^1$ )	5.0	m
Reference altitude from the seafloor ( $W^2$ )	1.2	m
Shooting interval	8.0	sec

Fig. 4 Survey plan given to the vehicle (Dive 12). Left:  $W^1$  for landmark search, Right:  $W^2$  for seafloor observation.Fig. 5 Trajectory of the AUV (during  $W^2$ ) and landmark locations estimated in real-time. The landmarks A and B were used for the dives 1 ~ 9, while the landmarks B and C were used for the dives 10 ~ 12.

レーザーとカメラを備えている。観測機器としては前方、斜め下向き、そして下向きに2台の合計4台のカメラを装備している。海底面の画像マッピングには機体前部に真下を向けて搭載された200万画素のデジタルカラーカメラ(図1のMosaicing camera)を用いる。

## 2-2. 観測アルゴリズムの最適化

実験場所は東へ下る斜度20%の急斜面であり、高さ数

mに及ぶハオリムシ群集が点在している。そこで海底面やハオリムシ群集によるランドマークの誤探知を防ぐため観測アルゴリズムに以下の修正を加える。これは前回と同様の処置である。

第一は、海底面による誤探知を防ぐためにプロファイラーによる観測範囲をビーカルの東側(斜面の谷側)に制限することである。第二は、ハオリムシ群集による誤探知を防ぐために観測ステージを二段階にわけることで

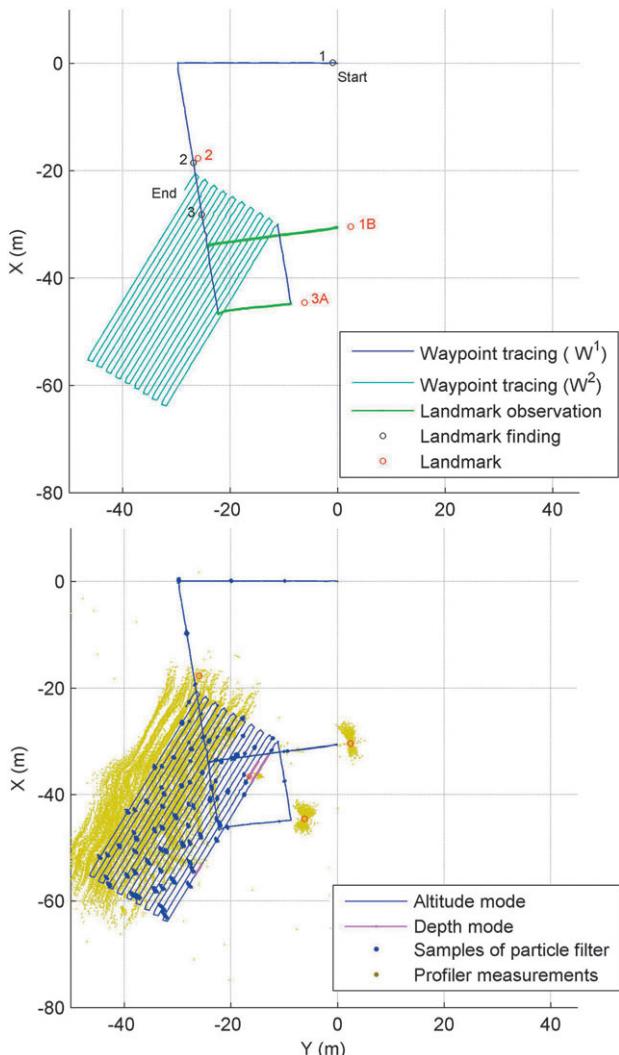


Fig. 6 Estimated trajectory of the vehicle (Dive 12). Top: colored by the path planning mode. Bottom: colored by the terrain tracking mode.

ある。ランドマーク探索経路 ( $W^1$ ) を第一ステージとし、海底面からの高度はハオリムシ群集よりも十分高いと思われる5mを保持する。そして人工ランドマークを基準とする画像観測経路 ( $W^2$ ) への移行後を第二ステージとし、高度1.2mで画像観測を行うが新たなランドマーク探索は行わない。

### 2-3. 手順

まず、観測海域に図2に示す人工ランドマークを2本設置する。遠距離から発見しやすくするためにアルミ材を2本増やし、前回よりも約2m長くした。設置方法は、母船をゆっくりと前進させつつ船尾から繰り出し、投入地点付近で切り離すというものである。図3は1本目のランドマーク投入に向けて位置調整中の様子である。

ランドマークの設置が終わると、次にビーグルを展開する。母船から投入され全自動行動を開始したビーグルは、海底面までの高度が5mに達するまで垂直に降下した後に自律ナビゲーション手法による観測活動を開始する。そして全てのウェイポイントを通過するか何らかの異常を検知したら浮上し、全自動行動を終了する。ビーグルの浮上を確認したら無線LANによる遠隔操縦によって誘導して母船に収容し、ビーグル内部に保存された観測結果を回収する。なお、本実験においては安全のために音響コマンドリンクによってビーグルの状態をモニターするが、緊急時を除いて水中のビーグルに指示を送ることはない。電池の制限により各潜航は最大で3時間程度とし、運用上の不安から夜間の展開は行わないものとした。

観測に関する主なパラメータを表2に示す。画像観測経路 ( $W^2$ ) における前進速度が0.08m/sと遅いのは、フラッシュの発光間隔の制限により撮影間隔を8秒とする必要があったためである。

図4はビーグルに与えたウェイポイントの例である。左側がスタート地点（高度5mまで降下した地点）を原点とするランドマーク探索経路 ( $W^1$ ) であり、スタート地点に到達した瞬間にビーグル内蔵の磁気コンパスによって計測された北方向をX軸の正方向にとる。 $W^1$ を広範囲に設定したのは、ビーグルの投入地点にずれがあったとしても確実にランドマークを発見するためである。右側は画像観測経路 ( $W^2$ ) で、1mピッチの並行直線からなる。二つの人工ランドマークのうち $W^1$ におけるX座標の小さいほうから $m_A$ 、 $m_B$ とすると、 $W^2$ の定義座標系

Table 3 Autonomous dives performed by the AUV Tri-Dog 1 during the sea experiments.

Dive #	Date	Time (hh:mm)			Travel distance (m) $W^1$ $W^2$	No. of pictures		Trigger
		Start	End	Duration		Forward	Downward	
1	2007/8/16	16:58	18:23	1:25	480 0	5088	247	Time out
2	2007/8/17	8:46	11:38	2:52	750 410	10301	650	Complete
3	2007/8/17	15:50	17:31	1:41	90 320	6059	524	Complete
4	2007/8/18	8:29	9:19	0:50	170 60	2974	98	DVL error
5	2007/8/18	14:07	15:14	1:07	240 60	3998	167	DVL error
6	2007/8/19	8:19	11:13	2:54	250 520	10487	837	Time out
7	2007/8/19	14:15	17:10	2:55	180 590	10517	955	Time out
8	2007/8/20	8:27	11:32	3:05	150 680	11104	1111	Time out
9	2007/8/20	14:09	17:14	3:05	80 720	11105	1172	Time out
10	2007/8/21	8:09	11:14	3:05	80 710	11097	1156	Time out
11	2007/8/21	14:16	17:21	3:05	120 700	11103	1174	Time out
12	2007/8/22	8:16	11:21	3:05	80 750	11103	1197	Time out

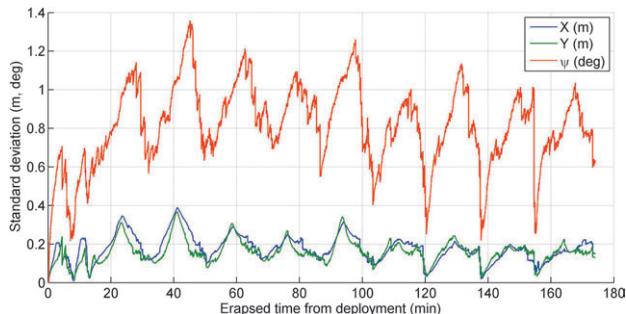


Fig. 7 Standard deviation of the samples of Particle filter (Dive 12).

の原点は  $\mathbf{m}_A$ 、X 軸の正方向は  $\mathbf{m}_A$  から  $\mathbf{m}_B$  に向かう方向である。広範囲をマッピングするために潜航ごとに異なる観測経路 ( $W^2$ ) を設定したが、精度比較を行うために若干のオーバーラップを持たせた。

設置した人工ランドマーク周辺の観測が終わったら、ランドマークを打ち直して観測範囲を拡大する。ただし位置を変えるランドマークは一回につき一本のみとし、残りの一本を基準として潜航間の位置合わせができるようとした。最終的には全観測結果を統合し、広範囲にわたる海底画像マップを作成する。

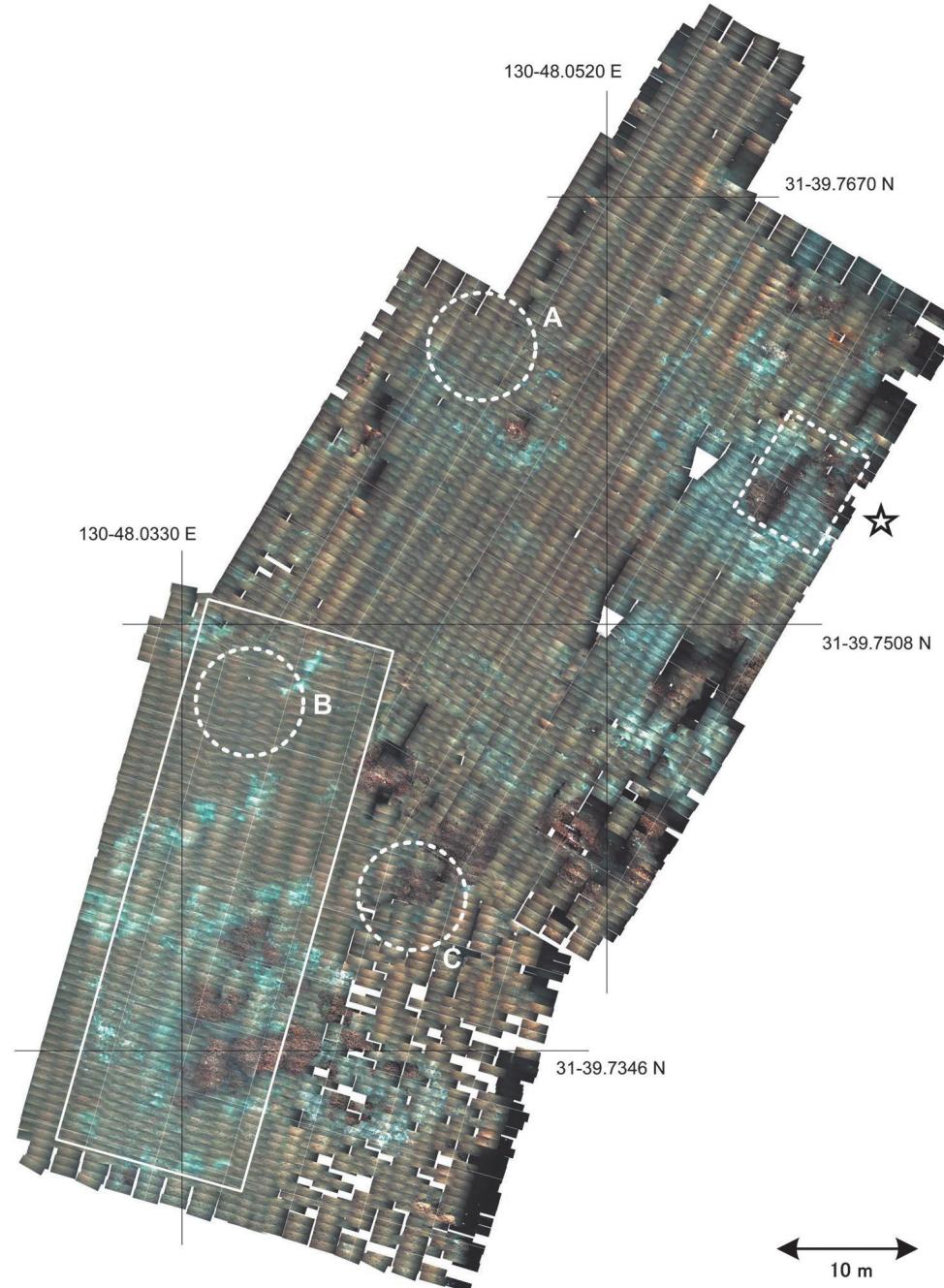


Fig. 8 Photomosaic of the Tagiri vent field made with 7,289 pictures obtained through the Dives 3, 7, 8, 9, 10, 11, 12. Grid size is  $30 \times 30$  m (black) and  $5 \times 5$  m (white). The bold rectangle shows the part mapped by the last experiments (see Fig.26 on the literature (Maki et al., 2008)).

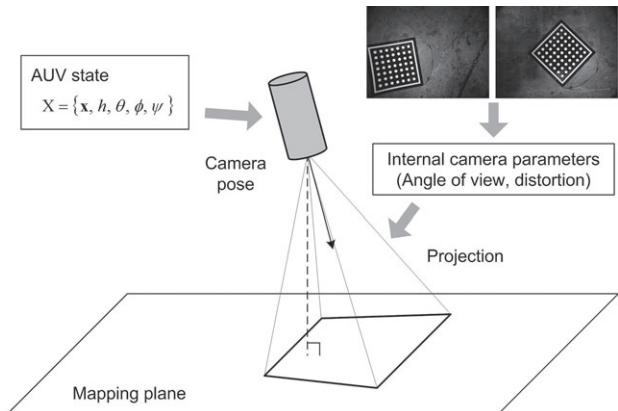


Fig. 9 Photo mapping based on the navigation data obtained during observation.

### 3. 結果

#### 3-1. 概要

本実験において、ビーグルは全12回の完全自律潜航に成功した。潜航一覧を表3に示す。総潜航時間は29時間9分、総観測距離はランドマーク探索経路( $W^1$ )が2,670m、人工ランドマーク基準の画像観測経路( $W^2$ )が5,520mであった。画像マッピング用カメラによって撮影された枚数は延べ9,288枚である。ただしこの数字には海底まで距離があったことやフラッシュの発光不良などにより海底面が写っていない画像も含まれる。

前半の潜航ではランドマークを発見できずに浮上することもあったが、各種パラメータの調整ならびにバグ修正の結果、第7潜航からは連続して安定した観測に成功した。表3右端の列(Trigger)はビーグルが浮上した理由であり、Completeはウェイポイントを全て通過したこと、Time outはあらかじめ設定しておいた制限時間を超過したことを意味する。第6潜航以降の浮上理由が全てTime outであるのは、ウェイポイントを大量に与えることで電池が切れる制限時間一杯まで観測させたためである。ウェイポイント通過に要する時間はランドマークの位置関係やランドマーク発見のタイミング等によって変わる。そこでウェイポイントを多めに与えておけば、ランドマークとの関係に関わらず制限時間一杯まで観測をさせることができる。

#### 3-2. ビーグルの航跡

図5に人工ランドマークの設置位置とビーグルの航跡を示す。これはビーグルが観測中リアルタイムに推定した航跡を人工ランドマークを基準として絶対座標系に変換したものである。見易さのため画像観測経路( $W^2$ )のみ示した。ランドマークは初めA、B地点に設置されていたが、第9潜航までにこの周辺の観測を終了したため、A地点のランドマークをC地点に設置しなおした。

このため実際に存在したランドマークは、第9潜航までにAとBのみ、第10潜航以降はBとCのみである。ランドマークAとCには母船のSSBLによって測位できるようにトランスポンダを装備していたが、噴気の影響及びトランスポンダ自体の不具合のため精度よく測位することはできなかった。このためランドマークの絶対位置は、SSBL計測値のほかに投入時の母船の位置、潮流、ビーグルによる観測結果、従来の調査活動により設置されていたマーカーの位置等を総合的に判断することで推定した。

#### 3-3. 第12潜航の詳細

図6は第12潜航の航跡(リアルタイム推定値)である。上段が水平方向の航行モードによって色分けしたものであり、発見したランドマーク位置を赤丸で、ランドマーク発見時のビーグル位置を黒丸で示す。それぞれ発見順に番号を付す。スタート地点(原点)を出発したビーグルは、まずは図4左側のランドマーク探索経路 $W^1$ を通りながらランドマーク探索を行い、発見したランドマークが進路真横に来た時点で接近して種類判別を行った。そして3番のランドマークを二つ目の人工ランドマークと認定した時点で画像観測経路 $W^2$ へ移行した。なお、図6のランドマークに付けられた記号A、Bは図5ではなく、図4の $m_A$ 、 $m_B$ に対応している。図6下段は地形追従モードによって色分けした航跡に、プロファイラーの計測値とパーティクルフィルタのサンプル集合(10mごと)を重ねたものである。観測経路の西側(-Y側)に広範囲に渡って得られたプロファイラー計測値は海底面によるものであるが、第2-2節で述べた修正により測位への影響はない。

図7はパーティクルフィルタのサンプル集合の標準偏差であり、ビーグルがリアルタイムに推定した自己状態(水平位置と方位)の確からしさを表している。本結果はビーグル自身による推定値であり絶対的な誤差とは異なるが、水平位置が0.1～0.4m、方位が0.4～1.2deg程度で安定している。標準偏差はビーグルとランドマークの位置関係と関係がある。ランドマークに近い画像観測経路の北側(+X方向)では標準偏差が小さくなり、反対に南側では大きくなっている。

#### 3-4. 大規模画像マッピング

図5に示した7回の潜航(Dives 3, 7, 8, 9, 10, 11, 12)の結果から、観測範囲全体の画像マップを作成した。結果を図8に示す。本マップのカバー範囲はおよそ40×90m、面積は約3000m<sup>2</sup>である。作成には7,289枚の画像が使用された。

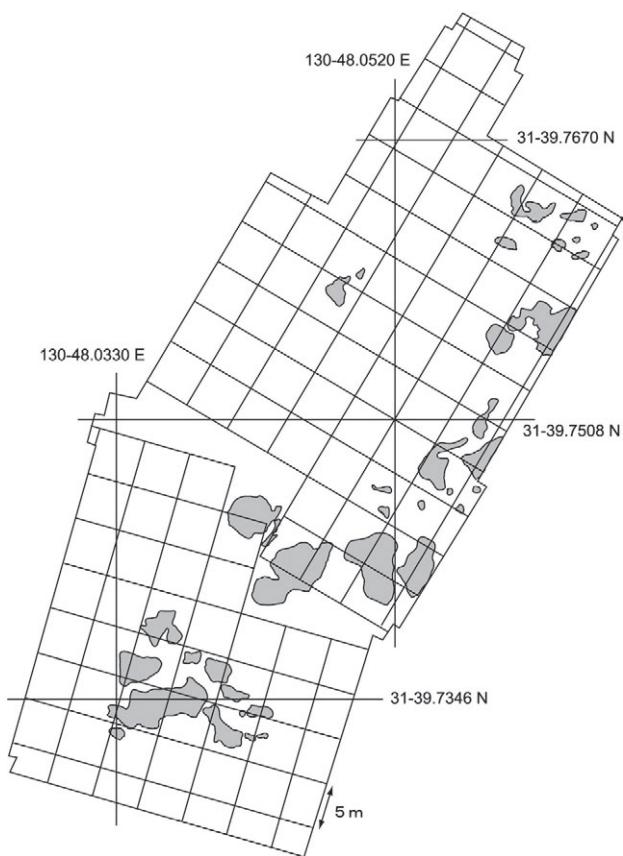


Fig. 10 Region of the tube-worm colonies estimated from Fig. 8.

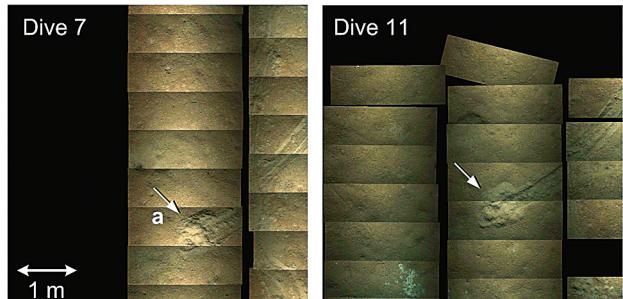


Fig. 11 Comparison of the part A on Fig. 8.

本マップの作成の流れは以下の通りである。まずはAUV状態のリアルタイム推定結果を用いて各潜航ごとの画像マップを作成する。これは各潜航において撮影された全ての画像について、図9のように撮影の瞬間のAUV状態に従ってカメラ位置・姿勢を決め、水平面に投影することで得られる。カメラから投影面までの距離は海底面からの高度を基準にして定める。レンズ等による画像の歪みはあらかじめ計測しておき、投影時に補正する。同じ場所に複数の画像が重なった場合はピクセルごとに色が明るい方を採用する。このようにして各潜航の画像マップが得られたら、人工ランドマーク位置を基準として絶対座標系に配置する。

図8におけるハオリムシ群集の領域を図10に示す。図8, 10から、観測範囲全域におけるハオリムシ群集やバ

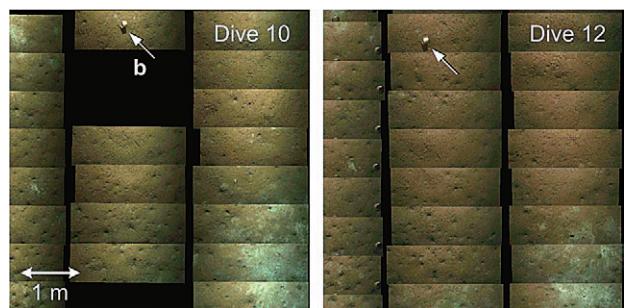


Fig. 12 Comparison of the part B on Fig. 8.

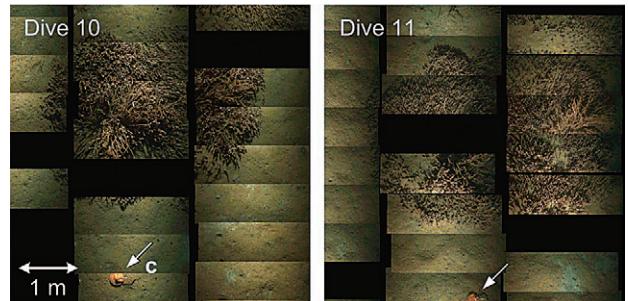


Fig. 13 Comparison of the part C on Fig. 8.

クテリアマット（白い部分）等の分布を把握することができる。また、図8に実線の白枠で示した領域は前回の実験におけるマッピング範囲（巻ほか（2008）の図26）である。両者を比較することで、ハオリムシ群集の成長、消失等この間（約5ヶ月間）に起こった変化を調べることができよう。

### 3-5. マッピング精度の検証

自律ナビゲーション手法によるマッピング精度を検証するために、図8に円で示した領域A, B, Cについて潜航ごとの比較を行った。結果を図11～13に示す。これらの画像はそれぞれ左上に記した潜航によるマッピング結果であり、人工ランドマークに対して全く同一箇所とされた部分の比較である。各画像中に矢印で示した特徴物a～cの位置を左右で比較したところ表4の結果を得た。 $\Delta x$ ,  $\Delta y$ は左側から見た右側の相対位置であり、 $\Delta r$ は両者の直線距離、即ち $\Delta r = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}$ である。この結果は真値との比較ではないため繰り返し精度に過ぎないが、実環境において真値を計測することはほぼ不可能であるため、本稿ではこの繰り返し精度をもってマッピング精度と見なす。同じく真値を得ることが難しい水路測量においては計測値の標準偏差を用いて精度評価がなされている（The International Hydrographic Organization, 1997）。

### 4. 考察

本実験において、Tri-Dog 1は全12回の自律ミッションに成功した。また、3000平方メートルに及ぶ海底面の

Table 4 Horizontal offset of the photomosaics.

	$\Delta x$ (m)	$\Delta y$ (m)	$\Delta r$ (m)
a	0.47	-0.24	0.53
b	-0.28	-0.23	0.36
c	-0.39	0.72	0.81

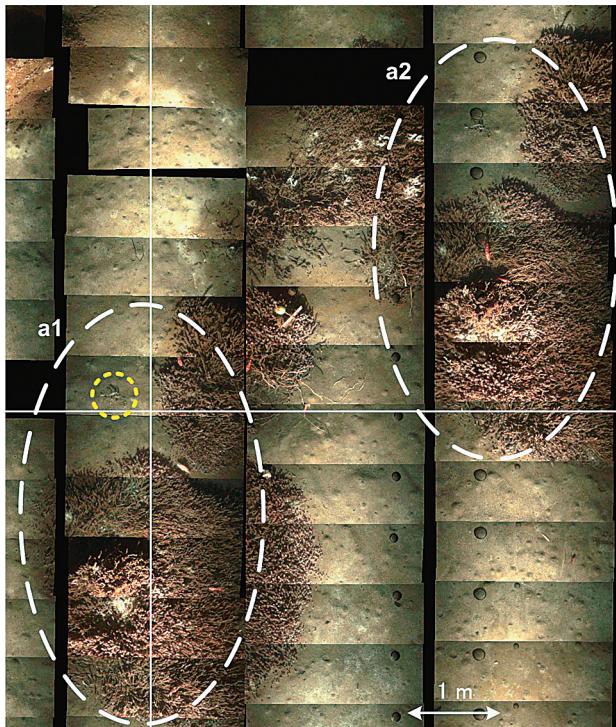


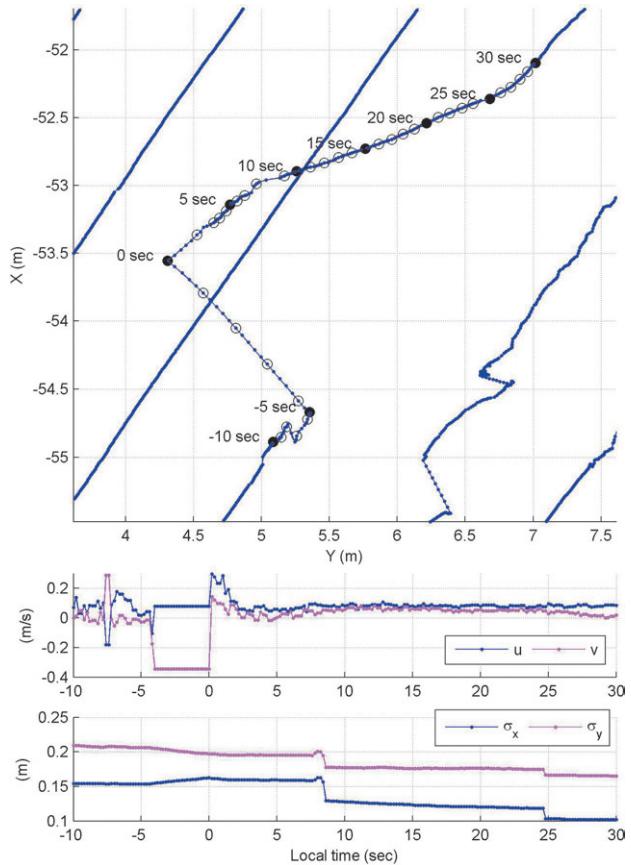
Fig. 14 Part of the photomosaic of dive 8 indicated by the starred rectangle on Fig. 8.

画像モザイクを取得することができた。図8に示すモザイク画像からは、ハオリムシ群集やバクテリアマット等の海底面の微細な特徴物の分布を把握することができる。また、その誤差は複数の潜航間で0.5m程度であった。このことは、0.5m程度の誤差で繰り返し観測が可能であることを意味する。画像マップの目的によっては、0.5 mの誤差は不十分であるかもしれない。しかしながら画像間に適当なオーバーラップがあれば、画像相関を用いた後処理によってよりクオリティの高いマッピングが可能である (Pizarro et al., 2003; Nicosevici et al., 2005; Eustice, 2005)。観測時に重要なことは撮影漏れや重複を防ぐことであり、0.5mという精度はこの目的のためには十分であろう。

以下の節では、本実験によって明らかとなった問題点ならびに有効な点について議論する。

#### 4-1. 第8潜航:DVLノイズの問題

図14は図8に☆印の点線白枠で示した箇所の第8潜航における画像マップである。図中にある二つのハオリムシ群集a1, a2は形状が全く同じであることから同一のも

Fig. 15 Part of the trajectory of dive 8 shown as b on Fig. 5. Bottom: horizontal velocity measured by the DVL ( $\hat{u}$ ,  $\hat{v}$ ) and standard deviations of the samples in X direction ( $\sigma_x$ ) and Y direction ( $\sigma_y$ ) with the time reference indicated on the trajectory.

のである可能性が極めて高いが、黄色の円で示した特徴物を基準とすると4.86mも離れている。これはa1を観測してからa2を観測するまでの間にビークルの測位誤差が同程度増加したことを意味するが、この原因は何であろうか。

図5に示した第8潜航の航跡を見ると地点a,b,cにおいて乱れがあり、中でも地点bにおいては進行方向左側に約1.5m急激にスウェイしている。このような乱れの原因としては

- ・プロファイラー計測値のノイズによりパーティクルフィルタのサンプル集合が誤った位置に収束したこと
- ・流れ等の外乱によりビークルが実際に動いたこと
- ・DVL計測値のノイズ

が考えられる。図15上段は地点bにおける航跡の拡大図であり、その下はDVL計測値 (サージ速度 $\hat{u}$ 、スウェイ速度 $\hat{v}$ )、さらにその下はサンプル集合の標準偏差 ( $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ) である。本図から0.35m/s程度のスウェイが約4秒間連続して計測されたこと、サンプルの標準偏差が横移動の前後でほとんど変化していないこと、そしてビーク

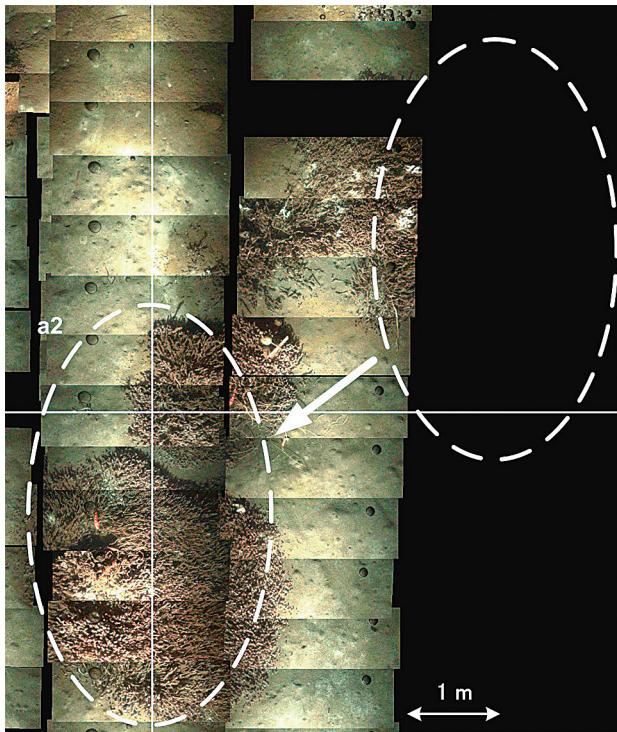


Fig. 16 Part of the photomosaic of dive 8 after DVL velocity filtering.

ルの移動量がサンプル分布範囲を超えていていることがわかる。またスウェイの加速度が $1.0 \sim 2.5 \text{m/s}^2$ に達しており、ビーグルの運動特性から考えると不自然に大きい。さらに撮影画像からは図15の-5~0秒地点に横移動は確認できなかった。この傾向は地点a,cでも同様であったため各地点での撮影画像を調べたところ、地点aでは噴気、地点bではハオリムシ群集、そして地点cには露頭の存在が確認された。DVLは海底面からの反射波のドップラーシフトを利用して対地速度を計測するため、海底地形の急激な変化や音波を反射する浮遊物（噴気など）の影響を受ける。

DVLノイズによって水平位置がずれると、ビーグルは観測経路を保つために位置修正を行う。しかしながら実際の位置はずれていないため、ビーグルが正しい経路に近づくと「思う」につれ、実際には正しい経路から外れてしまう。この結果、DVLノイズによって乱されたのと同程度、逆の方向に測位誤差が発生する。パーティクルフィルタのサンプルの分布範囲がこの誤差よりも大きく、またプロファイラーによるランドマークの観測が可能であれば、この誤差は次第に修正されるであろう。しかしながらサンプル分布が狭ければ恒常的なエラーとして残ってしまう。第8潜航はランドマークよりも東側、つまり斜面の谷側を中心にしていたため、ランドマークを探知できる範囲に制限があった。

DVLノイズによる測位誤差拡大を防ぐための対策としては、

- ・DVL計測値に範囲を設け、範囲外の値が得られた場合はサンプルの移動を行わない
- ・パーティクルフィルタの更新時のDVLの誤差を大きく見積もる
- ・DVLの計測値だけでなくビーグルの撮影する海底画像を用いて水平速度を推定する

ことが考えられる。そこで後処理によってDVLに速度制限を掛けた場合の航跡を推定し、それに基づいて画像マップの再構築を試みた。速度フィルタリングは単純な範囲制限とし、具体的には計測値がサージ速度は-0.05~0.13m/s、スウェイ速度は-0.05~0.05m/sを超える場合にはその値に据え置くものとした。この閾値は実際の計測値を元に設定した。図16は上記の処理によって得られた第8潜航の画像マップのうち、図14と同じ範囲を抜き出したものである。一見するとa2が消滅したように見えるが、魚の位置や図左上に見られるオーバーラップの痕跡から、a2がa1のほぼ真上に移動したことがわかる。図14に黄色円で示した特徴物を基準とすると、a1とa2の位置誤差は4.86mから0.34mに減少した。この値は表4の結果に合致している。

以上の考察から、図14に見られる5m近い位置誤差の原因は環境に起因するDVLノイズであることが明らかとなった。しかしながらランドマーク探索をリアルタイムに行うという自律ナビゲーション手法の性質上、後処理によるDVLノイズの修正には限界がある。よりよい観測結果を得るためにには、DVLノイズのリアルタイムフィルタリングが重要である。環境に起因するDVLノイズは突発的で、かつ数秒間連続する場合があるため、フィルタリング手法としては移動平均のような統計的手法よりも、本稿で適用した範囲制限のような単純な手法が有効であろう。

#### 4-2. 第11潜航：ランドマークによる測位誤差の修正

図5を見ると第11潜航においても画像観測経路に航跡の乱れが確認できる。その原因について検討する。

図17は第11潜航の画像観測経路の航跡にパーティクルフィルタのサンプル分布（10mおき）とプロファイラー計測値を重ねて表示したものである。桃色の航跡は障害物回避のため深度モード（巻ほか, 2008）を意味し、赤い星は障害物への異常接近を回避するための鉛直上昇を表す。また、航跡上の地点a~eにおいて画像マッピング用カメラによって撮影された画像をそれぞれ右側に示す。本図から画像観測経路の第一レグ（第1ウェイポイント $w_1^1$ ~第2ウェイポイント $w_2^1$ の間）において頻繁に深度モードに入っていることがわかる。b~e地点の画像に噴気が映っていることと、プロファイラーの計測値

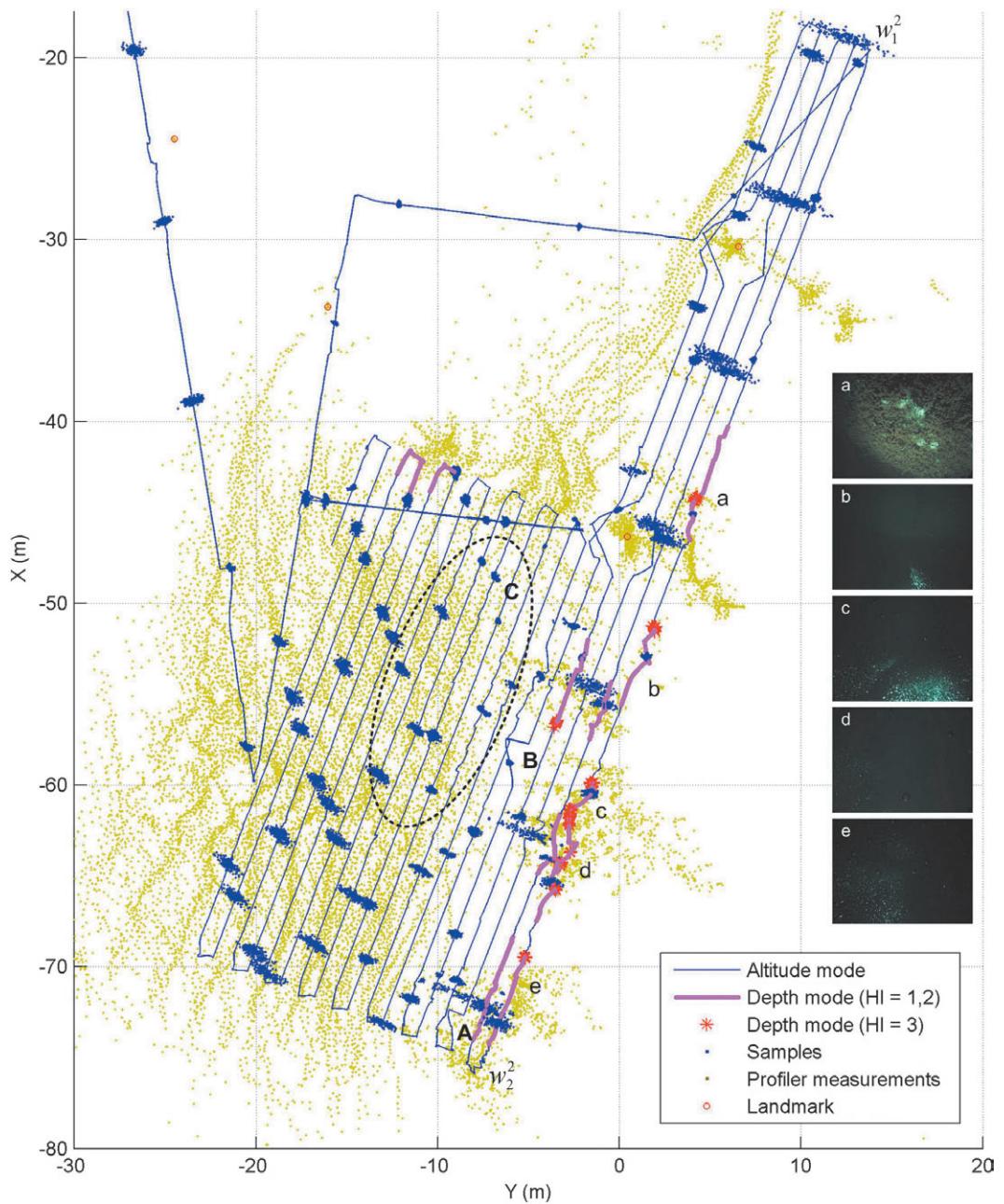


Fig. 17 Part of the AUV trajectory (Dive 11). The pictures on the right were taken by the mosaicing camera at the location indicated by the characters a ~ e.

が集中していることから、第一レグの深度モードは噴気群が原因と考えられる。この噴気群はランドマーク探索経路から離れていたためランドマークとして登録されていなかった。従ってビーグルは障害物センサによって検知した噴気を障害物と判断し、回避行動をとったのである。この結果ビーグルは噴気群の中で上昇しながら長時間留まることとなり、最終的には高度10m程度まで上昇した。同区間におけるDVL計測値には噴気の影響と思われるノイズが多数含まれていた。

図18は第11潜航の各期間におけるビーグルの航跡とプロファイラー計測値である。696-1696秒においてはプロファイラー計測値がランドマーク位置に集中している

が、1796-2796秒ではY方向に8m程度ずれている。人工ランドマークの位置は不变であるため、噴気群を通過することでY方向へ8m程度の測位誤差を生じたことがわかる。この原因は先に考察したように噴気によるDVLノイズのほか、高度上昇による対地速度の計測精度悪化が考えられる。

ところが図18の後半を見るとプロファイラー計測値とランドマークが再び重なっており、測位誤差が修正されたことがわかる。そこで図17の航跡を詳しく見てみると、地点A, BでY方向に1~2m程度「飛んで」いることがわかる。図19の左側は地点A, Bにおけるこれら激しい移動の前後のサンプル分布の比較であるが、A, Bいず

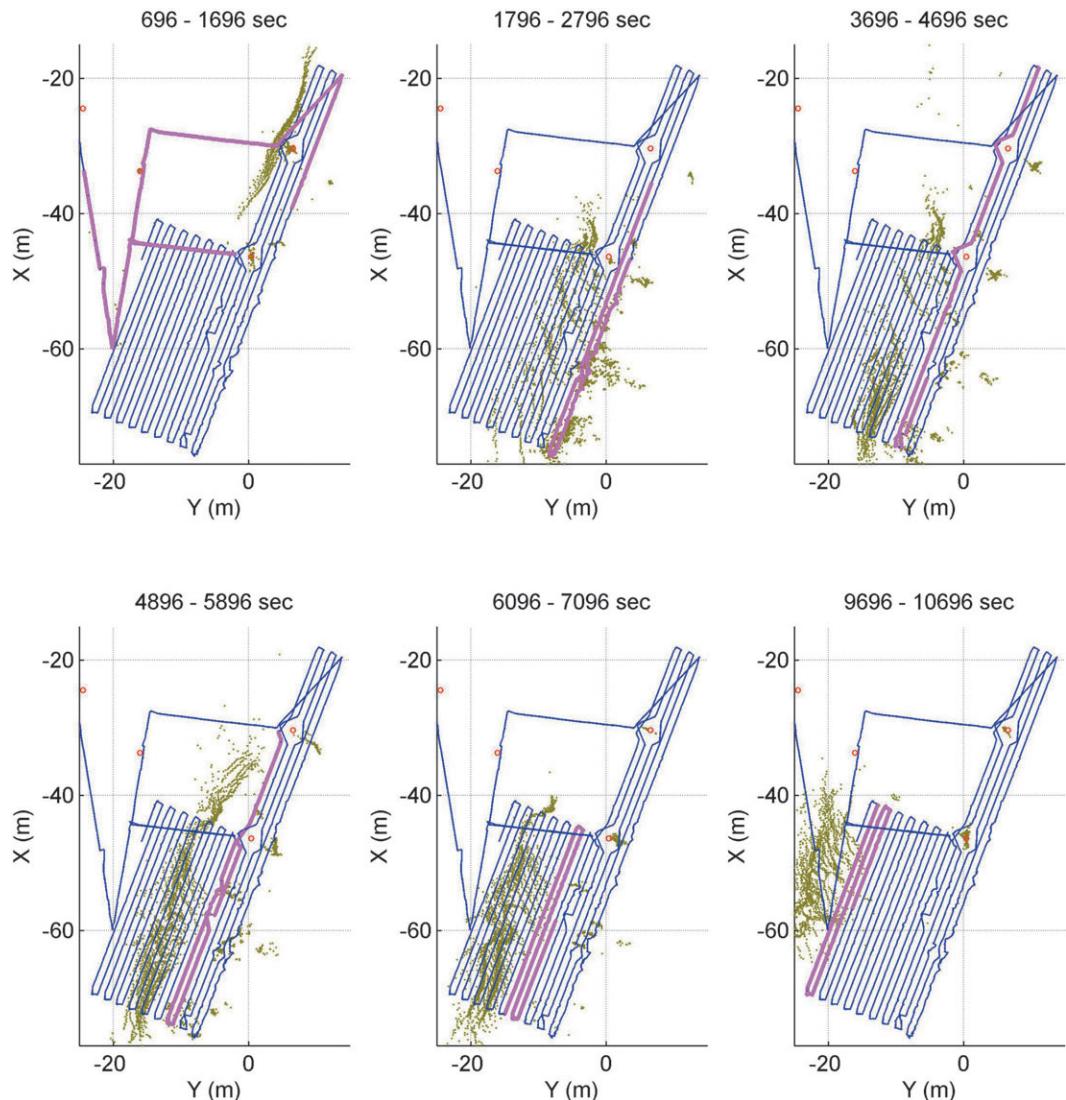


Fig. 18 AUV trajectory and profiler measurements during the time period indicated on the top of each figure (Dive 11).

れの場合も「飛んだ」後はサンプルが収束している。右側はサンプルの収束時に得られたプロファイラー計測値を、収束後のAUV状態（黒い太線）を基準として観測座標系に配置したものである。本図からプロファイラー計測値とランドマークが近づく方向に収束したことがわかる。

しかしながらAとBによる修正量を合計しても、当初発生した8mの測位誤差を修正するには足りない。そこで図17をさらに詳しく見てみると、楕円で示した領域において-Y方向への細かい位置修正が頻発しており、その間隔がプロファイラーの周期と合致することが確認された。また図ではわかりにくいが-Y方向に向かう短い経路でも位置修正が行われていた。以上の結果から、測位誤差の修正はプロファイラー計測値とランドマークのマッチングに基づくサンプルの収束によってなされたことが確認された。本件はセンサノイズに対する自律ナビゲーション手法のロバスト性を示す好例である。

## 5. おわりに

本論文では卷ほか（2008）の続編として、2007年8月にAUV Tri-Dog 1を用いて鹿児島湾たぎり噴気帯において行われた観測実験について報告した。

本実験においてTri-Dog 1は延べ12回、29時間におよぶ全自動潜航により、海底面に沿って高度1.2mで移動しながら海底面の写真撮影を行った。そして撮影された画像を観測時にリアルタイムに推定されたビーグル位置を基準として貼り合わせることで当該海域の3,000平方メートルにわたる画像マップを生成し、ハオリムシ群集やバクテリアマット等の詳細な分布を明らかにすることに成功した。筆者らの知る限り、AUVによるこれほど大規模な海底画像マッピングが報告されたのは世界初であり、ROVやHOVによる観測を含めても世界最大級である（Eustice, 2005）。また、複数の潜航で同じ場所を観測し、各潜航ごとに作成した画像マップを比較したと

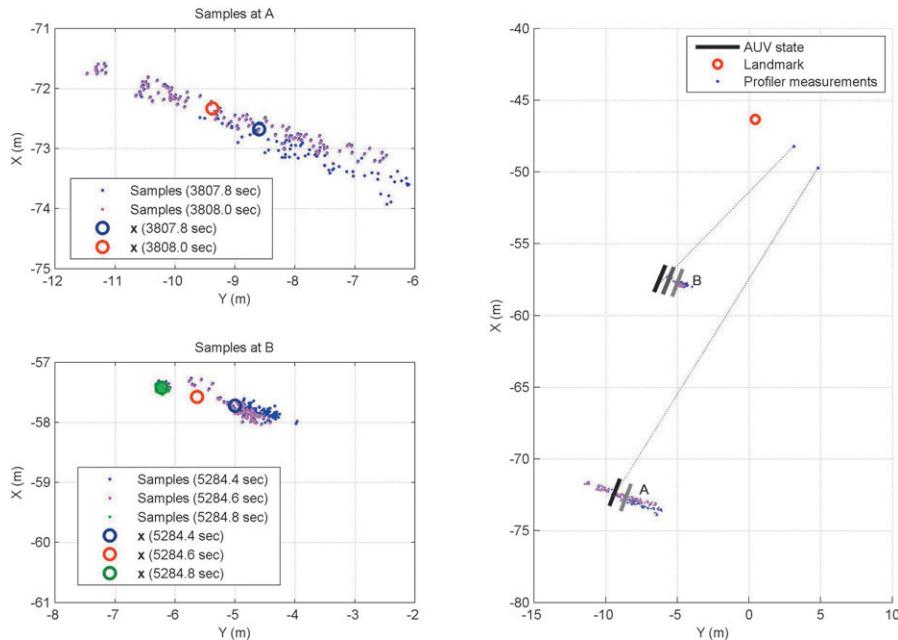


Fig. 19 Distribution of the samples and the AUV position  $x$  estimated as the weighted mean of the samples (Dive 11).

ころ、相対誤差は0.5m程度であることが確認された。

海底面の凹凸や噴気に起因するDVLノイズによって5m規模の測位誤差を生じうることが明らかとなったが、DVLのノイズフィルタリングを行うことで対処できることが確認された。また誤差範囲がパーティクルフィルタのサンプル分布の範囲内であれば、ランドマークとプロファイラー計測値のマッチングによって修正可能であることも確認された。

以上のように、筆者らが巻ほか（2008）で提案した自律ナビゲーション手法によって広範囲の海底画像マッピングを全自動で行うことが可能になった。また、実海域における連続12回の全自動潜航に成功したことから提案手法の安定性・実用性が検証された。本成果は海底観測技術の発展に大きく貢献するものである。今後の課題としては、画像相関情報を取り入れることによるリアルタイム状態推定精度ならびに後処理でのマッピング精度の向上や、複数のAUVが協力することによる測位精度向上および観測範囲の拡大等が挙げられる。また、AUVによる画像マッピングをより広範囲に渡って行うためには、水中ドッキング技術の開発やエネルギー源の高性能化など、AUVの長期展開に向けた取り組みが重要である。

## 謝辞

実験を行うに当たり、東京大学海洋研究所 窪川かおる教授、海洋研究開発機構 藤原義弘サブリーダー、岡山大学 山中寿朗准教授および淡青丸第KT-07-20次航海スタッフの方々から多大なるご支援をいただいた。ビー

クルを調整、運用するにあたり能勢義昭氏をはじめとする東京大学生産技術研究所浦研究室の方々から多大なるご支援をいただいた。ここに深く感謝の意を表する。

## 参考文献

- Eustice, R.: Large-Area Visually Augmented Navigation for Autonomous Underwater Vehicles: PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology, (2005)
- 橋本惇, 藤倉克則, 藤原義弘, 谷島恵美, 三浦知之, 塚原潤三, 上野宏共, 根建心具, 安藤哲夫, 小坂丈予, 木川田喜一: 鹿児島湾におけるハオリムシ群集のマッピング, 第12回しんかいシンポジウム予稿集, p.110-111, (1995)
- The International Hydrographic Organization: IHO Standards for Hydrographic Surveys (4th edition) : S-44, (2003)
- Kondo, H., T. Ura, and Y. Nose: Development of an autonomous underwater vehicle "Tri-Dog 1" toward practical use in shallow water: Journal of Robotics and Mechatronics, 13, 2, p.205-211, (2001)
- 近藤逸人: 自律型水中ロボットの観測行動に関する研究, 東京大学博士論文, (2001)
- 巻俊宏, 近藤逸人, 浦環, 能勢義昭, 坂巻隆: 自律型水中ロボットによる人工構造物の観測, 日本船舶海洋工学会論文集, 1, p.17-26, (2005)
- Maki, T., H. Kondo, T. Ura, and T. Sakamaki: Survey

- plan of the gas plumes of Lake Biwa by the AUV Tri-Dog 1 using a SLAM based navigation scheme, Proc. of LOS 2006, (2006)
- Maki, T., T. Ura, H. Mizushima, H. Kondo, T. Sakamaki, and M. Yanagisawa: Low altitude tracking of rugged seafloors for autonomous visual observation, Proc. of UT '07, (2007a)
- Maki, T., H. Kondo, T. Ura, and T. Sakamaki: Positioning method for an AUV using a profiling sonar and passive acoustic landmarks for close-range observation of seafloors, Proc. of Oceans '07 Europe, (2007b)
- Maki, T., H. Mizushima, H. Kondo, T. Ura, T. Sakamaki, and M. Yanagisawa: Real time path-planning of an AUV based on characteristics of passive acoustic landmarks for visual mapping of shallow vent fields, Proc. of Oceans '07 Vancouver, (2007c)
- 卷俊宏：海底環境の全自動観測の研究, 東京大学博士論文, (2008)
- 卷俊宏, 近藤逸人, 浦環, 水島隼人, 坂巻隆, 柳澤政生：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, 海洋調査技術, 20, 1, p.1-16, (2008)
- Nicosevici, T., S. Negahdaripour, and R. Garcia: Monocular-based 3-D seafloor reconstruction and ortho-mosaicing by piecewise planar representation: Proc. of Oceans '05, (2005)
- Pizarro, O. and H. Singh: Toward large-area mosaicing for underwater scientific applications: IEEE Journal of Oceanic Engineering, 28, 4, p.651-672, (2003)