

自律型海中ロボットシステムによる西之島海底調査

野口 侑要^{1,2}、関森 祐樹¹、巻 俊宏^{1*}

Seafloor survey of Nishinoshima Island using an Autonomous Underwater Vehicle

Yukiyasu NOGUCHI^{1,2}, Yuki SEKIMORI¹ & Toshihiro MAKI^{1*}

1. 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, 4-6-1 Komaba, Meguro, Tokyo
153-8505, Japan.
2. (現所属) ROVCO LIMITED, Rovco, The Quorum, Bond Street South, Bristol, England,
BS1 3AE, United Kingdom.

* maki@iis.u-tokyo.ac.jp (author for correspondence)

要旨

東京都小笠原諸島の無人の火山島である西之島は、2020年の大規模な噴火により陸上部分は溶岩や火山灰に覆われたことが明らかになっている一方、海中部分については調査が進んでおらず、溶岩や火山灰がどの程度まで広がっているか、また魚類や底生生物等がどのような状況になっているのか明らかでなかった。そこで、2021年7月、低コスト自律型海中ロボットシステムを用いて海中および海底の画像観測を実施した。強い潮流下での調査であったが、急峻な地形を含む海底の詳細な光学画像撮影に成功した。西之島北部の海底において火山灰が降り積もる平坦な地形が確認された。北東部の海底においては噴気が確認された。また、サメ等の大型魚から小型魚、タコ等の複数の遊泳生物が確認された。

キーワード

ASV (Autonomous Surface Vehicle)、AUV (Autonomous Underwater Vehicle)、画像観測、噴気

1. はじめに

西之島は東京都小笠原諸島にある無人の火山島である。2020年の大規模な噴火により陸上部分は溶岩や火山灰に覆われたことが明らかになっている一方、海中部分については調査が進んでおらず、溶岩や火山灰がどの程度まで広がっているか、また魚類や底生生物等がどのような状況になっているのか明らかでなかった。

そこで筆者たちは2021年7月に環境省西之島総合学術調査事業の一部として西之島周辺海域の調査を行った。本調査では筆者たちが開発した低コスト自律型海中ロボットシステムを用いて海中および海底の光学画像を撮影した(野口ほか、2021)。近年、自律型海中ロボットを用いた海底画像観測が実用化しつつある(Maki *et al.*, 2011)。今回用いたシステムは従来のものより安価かつ小型であり、海底画像観測をより多くの機会に実施できるように開発されたものである。

本稿ではシステムの概要を示すとともに、時間帯により急変する潮流や、険しい海底地形が存在する厳しい環境下で行うこととなった本調査の概要を述べる。

2. 調査方法

2-1. 低コスト自律型海中ロボットシステム

本システムは筆者たちの研究室で開発された「HATTORI (Highly Agile Terrain Tracker for Ocean Research and Investigation)」および「BUTTORI (Buoy for HATTORI)」から成る(図1)。

HATTORIはコンピュータ、センサ、スラスタ、バッテリーを内蔵し、設定したプログラムに従って自動で潜航を行う自律型海中ロボット(Autonomous Underwater Vehicle: AUV)である。表1に諸元を示す。海中ドローンとも呼ばれる遠隔操縦ロボット(Remotely Operated Vehicle: ROV)とは異なり、陸上と機体をつなぐテザーケーブルを必要としないので、テザーケーブルに動作を制限されることなく潜航を行うことができる。従来の画像観測用のAUVは大型で着揚収にクレーンが必要であったが、HATTORIは大きさが1.0 (L) × 0.48 (W) × 0.29 (H) [m]、重量が19 [kg]と小型軽量であり、小型船から人力で着揚収することができる。前端に備え付けられたスキャニングソナーで前方の障害物を検知し、任意方向の壁面に対して距離を保ちながら全自動で追従する機能を持っている(Noguchi & Maki, 2021)。前向きおよび下向きに取り付けられたカメラにより、海中海底の画像観測を行う。

BUTTORIはHATTORIを支援する自律無人ブイ(Autonomous Surface Vehicle: ASV)である(堀本ほか、2021)。諸元を表2に示す。大きさが0.8 (L) × 0.8 (W) × 1.6 (H) [m]、重量が20 [kg]と小型軽量であり、HATTORIと同様に小型船から人力で着揚収することができる。BUTTORI自身の緯度経度を計測するGNSSアンテナと、HATTORIの相対位置を音響で計測するUSBL(Ultra-Short BaseLine)により、海中のHATTORIの絶対位置をリアルタイムに計測することができる。また、HATTORIと音響通信をす

ることができ、リアルタイムに HATTORI の高度等の情報（テレメトリ）を運用者に示したり、HATTORI に対して緊急浮上コマンドを送信したりする等、安全に HATTORI を運用するための機能を備えている。また BUTTORI は運動機能を持っており、無線による遠隔操縦の他、自動で定点に留まったり HATTORI を追尾したりすることができる。

2-2. 調査の流れ

調査は 2021 年 7 月 9～12 日の 4 日間行われた。当時西之島には噴火警報が発令されており火口から 1,500 [m]の範囲へ進入できなかったことから、その範囲外である西之島北部及び北東部において調査を実施した。調査海域は流れが速い（約 0.5 [m/s]）うえに頻繁に向きが変わる状況であったため、安全のため、HATTORI は同一の潜航中は常に同じ方向（原則として観測開始時の水面での流向）に走るように設定した。HATTORI の潜航手順を以下および図 2 に示す。

1. 水面において無線通信で潜航開始の指令を受けると、真下を向いて降下する。
2. スキャニングソナーで海底を確認できたら、方位と海底までの高度を一定に保ちつつ、海底に沿って航行する。
3. 所定の時間が経過したら、真上を向いて浮上する。

方位や海底までの高度、潜航時間は潜航ごとに設定した。海底観測中の速度は 0.2 [m/s]、最大潜航深度は 60 [m]とした。BUTTORI は基本的には HATTORI の投入前に着水させて定点保持状態としたが、流れが速く定点保持が難しい場合には、HATTORI の潜航開始後に着水させ、流れに乗る形で HATTORI を追従させた。

3. 結果

3-1. 概要

HATTORI の潜航は計 27 回実施した。総潜航時間は 203 [min]、総移動距離は 4.7 [km](水平距離は 3.3 [km])となった。表 3 に各潜航の開始日時、テザーケーブルの有無、潜航時間、最大深度、移動距離、水平移動距離、主な底質を示す。Dive 19 は緊急浮上のコマンドを確かめる目的で行ったものであるため省略した。図 3 に BUTTORI で計測した HATTORI の航跡を示す。Dive 6, 14, 15, 21 等に見られるジグザグ状の部分は音響測位の誤差によるものである。なお、Dive 1～5, 9, 17, 23～27 はデッドレコニング（HATTORI の速度計測値の積分）による推定である。初日は動作確認のためにテザーケーブルをつないで 4 潜航、次にテザーケーブルを釣り糸に切り替えて 4 潜航を行った。2 日目以降は各日の初回や高度の設定を変えた際は安全のために釣り糸でつないで潜航を行い、その他の潜航では無索とした。全体として計 13 回の無索潜航を行った。1 潜航あたり最長の潜航時間は Dive 21 の 1,888 [s] であった。最大深度は Dive 21 の 59 [m]であった。Dive 21 の途中から HATTORI の対地速度センサが不調になった他、

Dive 22 において設定ミスにより HATTORI が海底に衝突するトラブルがあったが、何れも大事には至らなかった。

3-2. 底質および生物

7月9日、11日、12日の3日間は西之島北側で潜航を行った (Dive 1~8, 17~27)。西之島北側には水深 20~30 [m]の比較的平坦な地形が広がっていた。底質は火山灰と思われる砂であり、砂紋が至る所に確認できた。砂地の中には図 4 に示すような白い模様が確認できたほか、図 5 で示すように、石が点在する様子も確認することができた。Dive 21 ではその浅い平坦な海域を越えて北西方向の急斜面を下り、最大深度 60 [m]まで潜航を行った。急斜面には図 6 で示す露頭を確認した。

7月10日は西之島北東部で潜航を行った。北東部は急峻な地形が広がっており、図 7 で示すような角ばった岩が多く確認された。また、図 8 で示すように、西之島の方向から延びるアメーバ状の地形が確認された。

岩が露出している部分には白色部が多数確認されたが (図 6~8)、硫黄等の無機物か、ヒドロ虫等の生物由来のものであるか等、詳細は不明である。生物については、図 9 や図 10 に示すように、複数種類の魚類やタコを確認することができた。岩影において小魚の群れを多数確認できた他、サメ等の大型魚も複数個体確認することができた。魚の群れが HATTORI の周りを周回しながらつきまとうことが度々あったため、HATTORI は魚群を障害物と認識してしまい、回避しようと浮き上がる動作を繰り返すこともあった。

3-3. Dive 15

代表的な潜航として西之島の北東地点で行った Dive 15 について説明する。潜航時間は 960 [s]、最大深度は 48 [m]、移動距離は 376 [m]、水平移動距離は 285 [m] であった。図 11 に HATTORI の深度の時間変化を示す。数メートル規模の高低差を伴う複雑な海底であったが、HATTORI は指定の高度 (2.0 [m]) を保って安全に航行することができた。潜航開始後 380 [s]から 420 [s]にかけて約 7 [m]の切り立った崖を下る様子が確認された。崖に対して姿勢を水平に保ちつつ前進したため、「崖下り」の際は HATTORI はほぼ真下を向くこととなった。このため HATTORI の下向きカメラで崖の表面を詳細に撮影することに成功した。これは通常の下向きの撮影ではほぼ不可能である。図 12 にこの崖の直上、潜航開始後 390 [s]時点での下向きカメラの画像を示す。図 13 と図 14 に、それぞれ崖の観測結果より後処理で作成した 3次元画像及び HATTORI の推定航跡を示す。3次元画像は下向きカメラの映像から Structure from Motion (SfM) (Snively *et al.*, 2008) により作成した。図 14 および対地速度センサの計測値より、崖の上には複雑な流れが存在し、HATTORI は最大 0.4 [m/s]の速さで横に流されたことがわかった。また、潜航開始後 470 [s]、深度 50 [m]の地点において火山活動によると思

われる噴気が確認された（図 15）。

4. 結論

本稿では、2021 年 7 月に実施した低コスト自律型海中ロボットシステムによる西之島の北部および東部の海底調査について報告した。本調査により、北部の比較的浅い平地には火山灰と思われる砂地が広がっている様子を確認した。北東部の急峻な斜面では角ばった岩石や、特徴的なアメーバ状の地形が広がっていることを確認した。また、北東部には火山活動によると思われる噴気が確認された。生物については、大型の藻類やサンゴ等は確認できなかったが、小魚からタコ、エイ、サメ等の様々な遊泳生物が確認できた。今後、地質学者や生物学者による更なる解析が待たれる。

技術的な点では、強い潮流、起伏の激しい地形という厳しい条件下でも全自動かつ低高度での海底画像観測を実施できたことから、筆者たちの開発した低コスト自律型海中ロボットシステムの有効性を示すことができた。今後の研究課題として、より効率的な観測を実現するために、潮流や海底形状に応じて観測経路をリアルタイムに更新する手法、画像観測だけでなく石や生物等のサンプリングも可能な AUV の開発等が挙げられる。

5. 謝辞

システムの開発にあたり、東京大学生産技術研究所の坂巻 隆氏、大熊 健児氏をはじめとする多くの方にご助力いただいた。本調査は環境省西之島総合学術調査事業の一部として実施された。調査の実施にあたり、自然環境研究センターおよび第三開洋丸のスタッフ各位にご助力いただいた。また、遊泳生物の同定は自然環境研究センターの豊田 有加氏、今井 仁氏にご助力いただいた。また、本研究は東京大学 GAP ファンドプログラムの支援を受けている。関係者の方々に深く感謝申し上げる。

6. 引用文献

- 堀本 大洋・手島 聡・大熊 健児・巻 俊宏 (2021) 自律型音響測位ブイの開発. ロボティクス・メカトロニクス講演会'21, 1A1-B16.
- Maki T, Kume A & Ura T (2011) Volumetric mapping of tubeworm colonies in Kagoshima Bay through autonomous robotic surveys. *Deep-Sea Research I* 58: 757-767.
- Noguchi Y & Maki T (2021) Tracking omnidirectional surfaces using a low-cost autonomous underwater vehicle. *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 46: 11-23.
- 野口 侑要・関森 祐樹・巻 俊宏 (2021) 低コスト自律型海中ロボットシステムによる西之島調査. 海洋調査技術学会 第 33 回研究成果発表会: 8-9.
- Snavely N, Seitz SM & Szeliski R (2008) Modeling the world from Internet photo collections. *International Journal of Computer Vision* 80: 189-210.

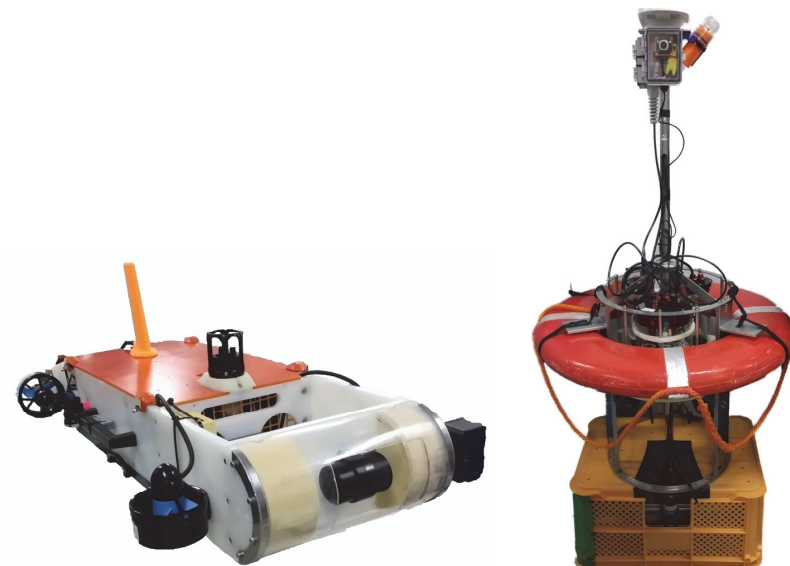


図 1. AUV HATTORI (左) と ASV BUTTORI (右)
 Figure 1. AUV HATTORI (left) and ASV BUTTORI (right)

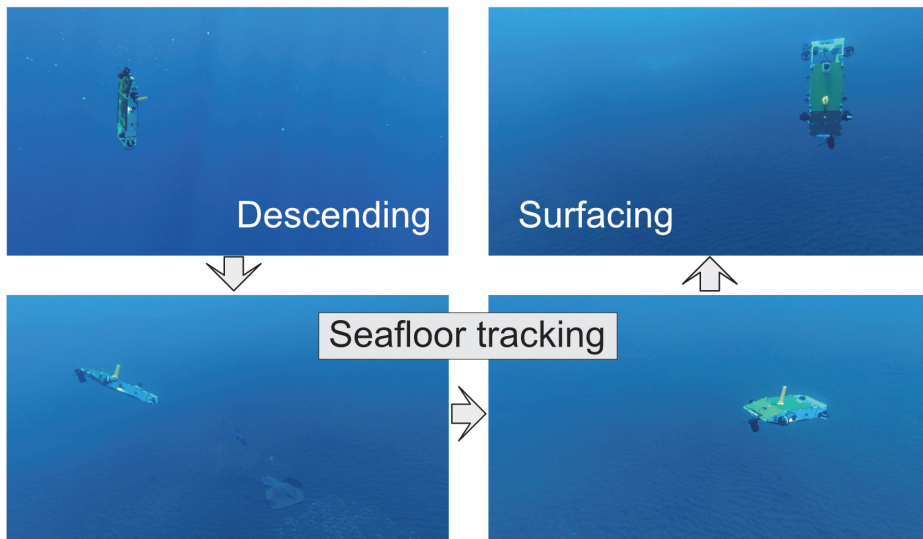


図 2. HATTORI の調査ミッションの流れ
 Figure 2. The procedure of the HATTORI's survey mission

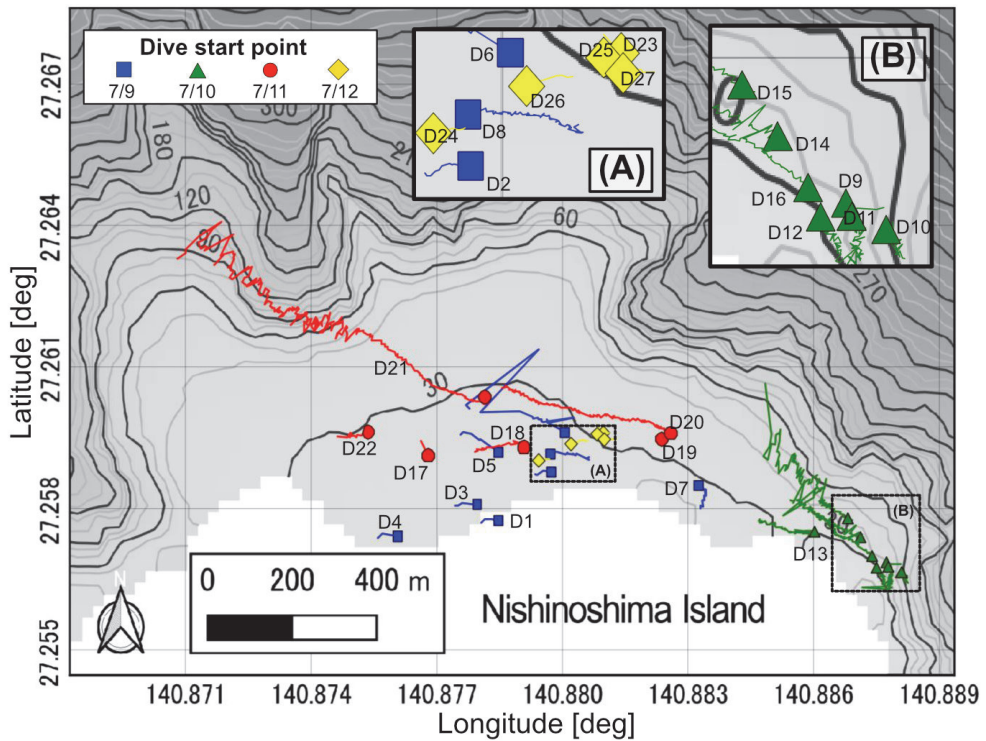


図3. HATTORI の航跡（背景の海底地形図は環境省西之島総合学術調査において第三開洋丸で得られた参考データを改変して作成）
潜航番号を D* と表記。

Figure 3. The trajectories of HATTORI (The bathymetric chart was made for the reference from the data obtained by KAIYOU MARU NO.3 during the comprehensive academic survey of Nishinoshima Island by Ministry of the Environment, Government of Japan)

The dive numbers are written as D*.

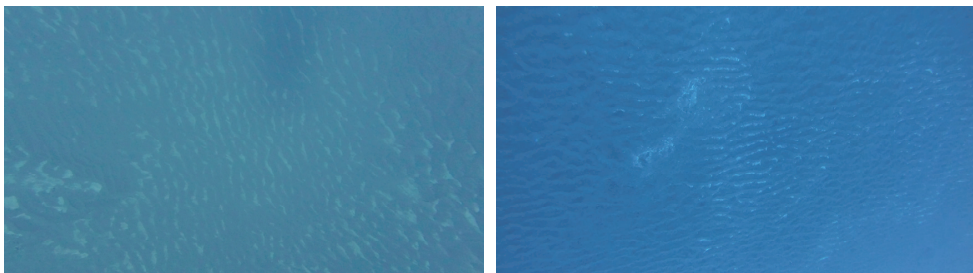


図4. 西之島北側に広がる平坦な砂地（左 Dive 7、右 Dive 20）

Figure 4. The flat sandy area on the north side of Nishinoshima Island (left: Dive 7, right: Dive 20)



図 5. 砂地に点在する石 (Dive 18)

Figure 5. Stones scattered on the sandy seafloor (Dive 18)

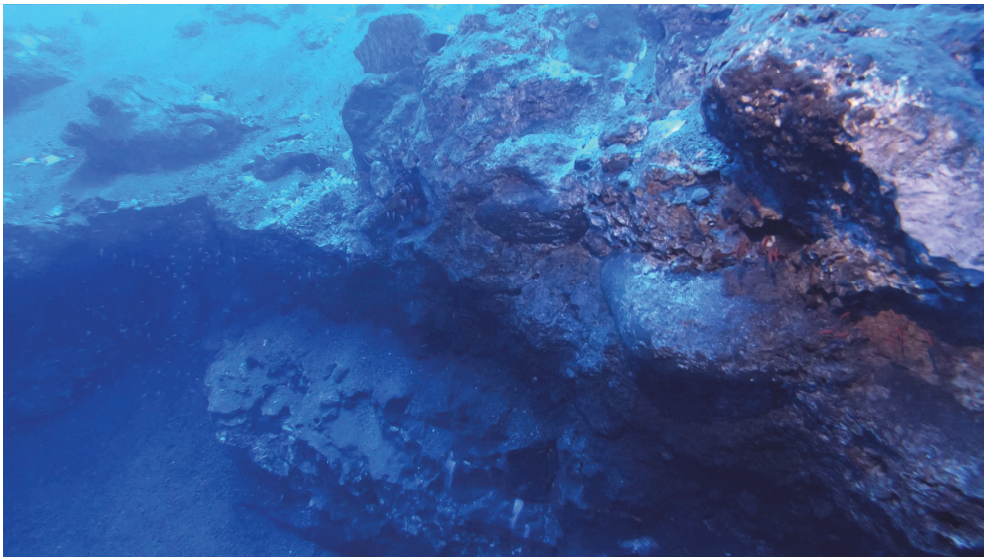


図 6. 斜面中ほどの露頭 (Dive 21)

Figure 6. The outcrop on the slope (Dive 21)



図 7. 西之島北東側に広がる岩石地帯 (左 Dive 11、右 Dive 14)

Figure 7. The rocky area on the northeast side of Nishinoshima Island (left: Dive 11, right: Dive 14)



図 8. 陸側からアメーバ状に延びる岩石 (魚 : カッポレ、Dive 11)

Figure 8. Amoeba-like rocks extending from the land side (Fish: *Caranx lugubris*, Dive 11)

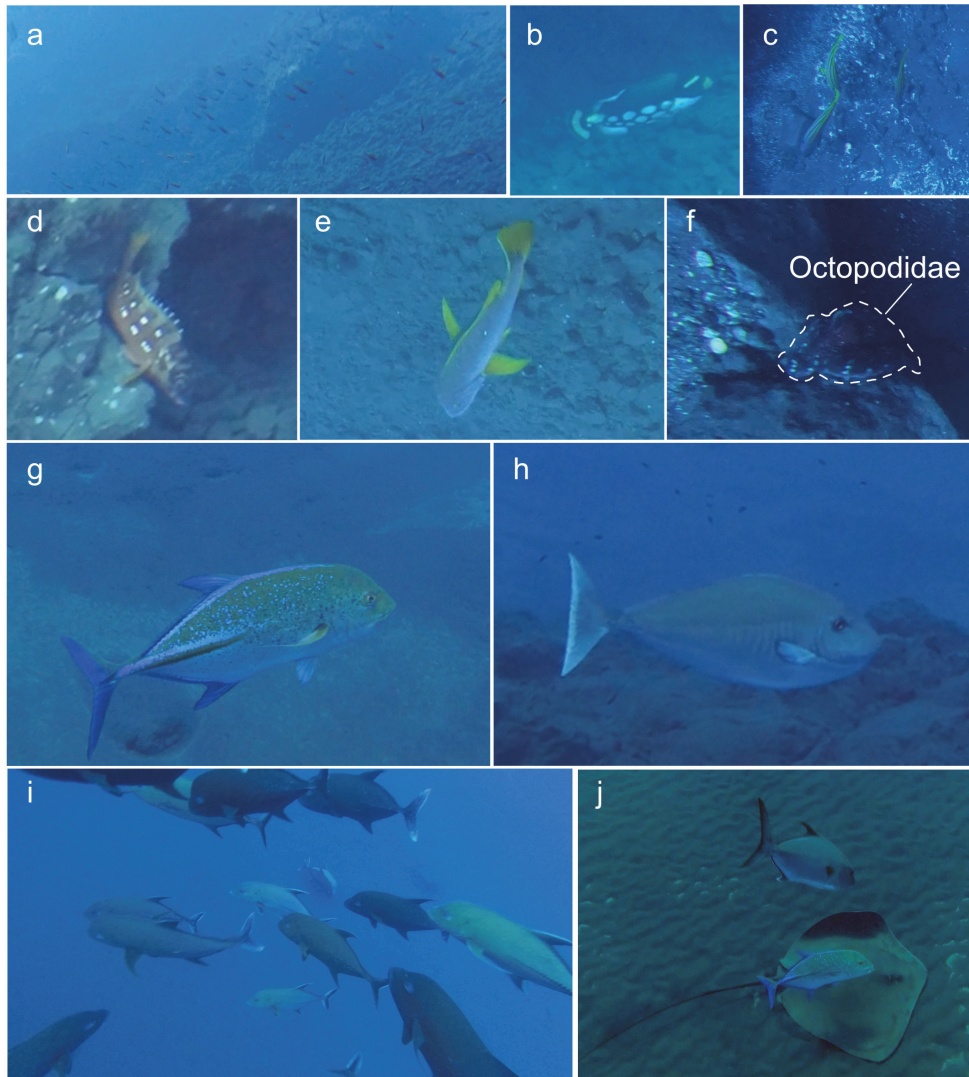


図9. 観測された遊泳生物 その1

a.魚種不明(Dive 12)、b.モンガラカワハギ(Dive 11)、c.ヨスジフエダイ(Dive 15)、d.アカハタ(Dive 11)、e.フエダイ(Dive 11)、f.マダコ科の一種(Dive 15)、g.カスマアジ(Dive 13)、h.テングハギモドキ(Dive 15)、i.カッポレ(Dive 16)、j.アカエイ科の一種、カスマアジ、アジ科の一種(Dive 25)。

Figure 9. The photos of several kinds of nektons (part 1)

a. Unidentified (Dive 12), b. *Balistoides conspicillum* (Dive 11), c. *Lutjanus kasmira* (Dive 15), d. *Epinephelus fasciatus* (Dive 11), e. *Lutjanus stellatus* (Dive 11), f. Octopodidae (Dive 15), g. *Caranx melampygus* (Dive 13), h. *Naso hexacanthus* (Dive 15), i. *Caranx lugubris* (Dive 16), j. Dasyatidae, *Caranx melampygus*, Carangidae (Dive 25).

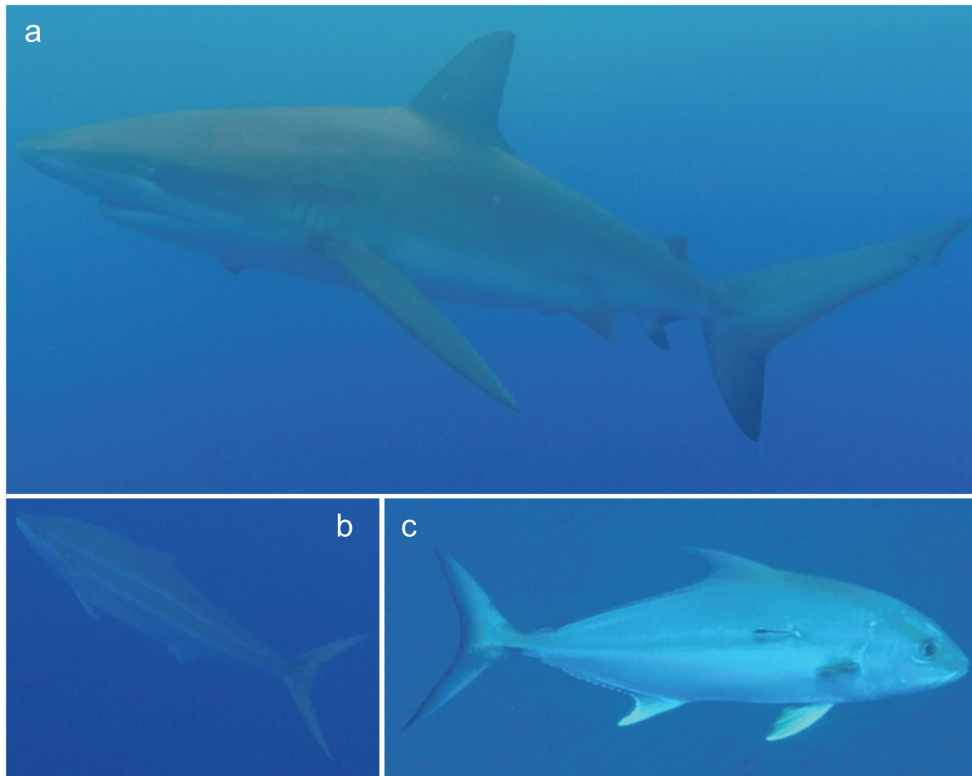


図 10. 観測された遊泳生物 その2

a. ガラパゴスザメ (Dive 16)、b. ツムブリ (Dive 16)、c. ヒレナガカンパチ (Dive 20)。

Figure 10. Photos of several kinds of nektons (part 2)

a. *Carcharhinus galapagensis* (Dive 16), b. *Elagatis bipinnulata* (Dive 16), c. *Seriola rivoliana* (Dive 20).

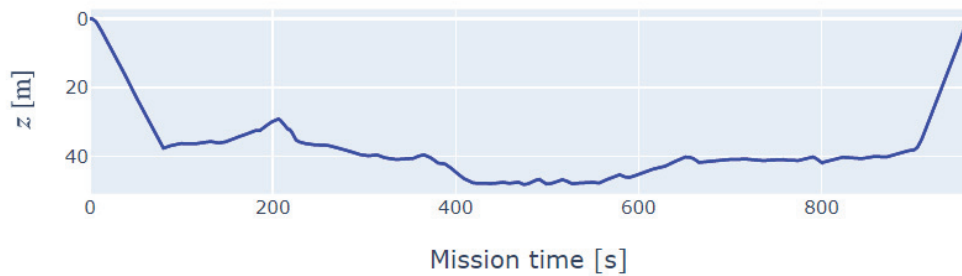


図 11. HATTORI の深度 (Dive 15)

Figure 11. The depth of HATTORI (Dive 15)

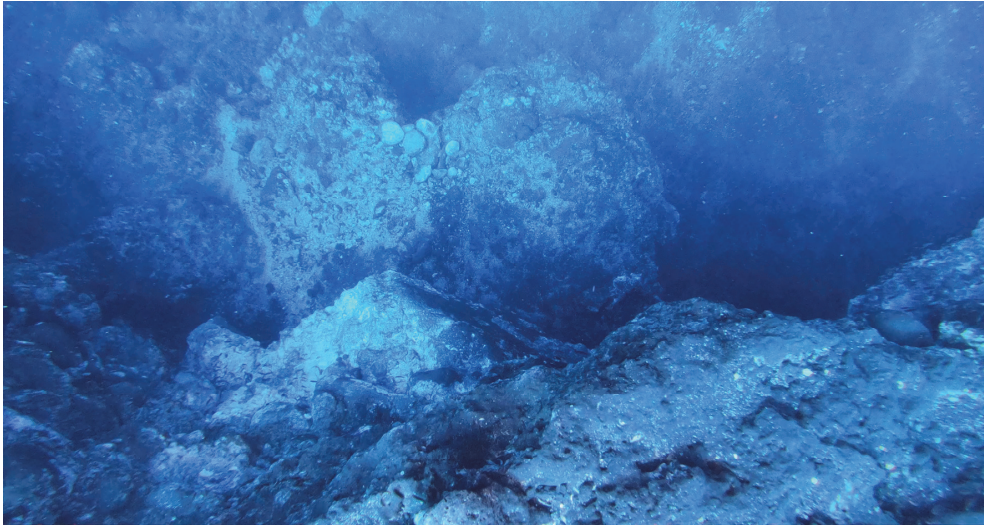


図 12. 高さ約 7 [m]の崖 (Dive 15、上から下向きに撮影) (野口ほか、2021)
Figure 12. The cliff about 7 [m] high (Dive 15, taken from above) (Noguchi *et al.*, 2021)

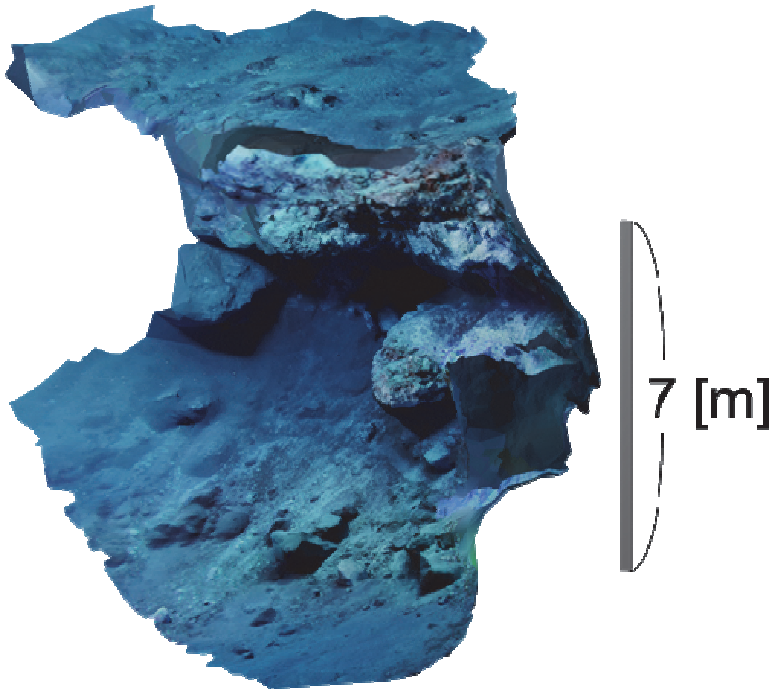


図 13. 崖の 3 次元画像 (野口ほか、2021)
Figure 13. The 3D image of the cliff (Noguchi *et al.*, 2021)

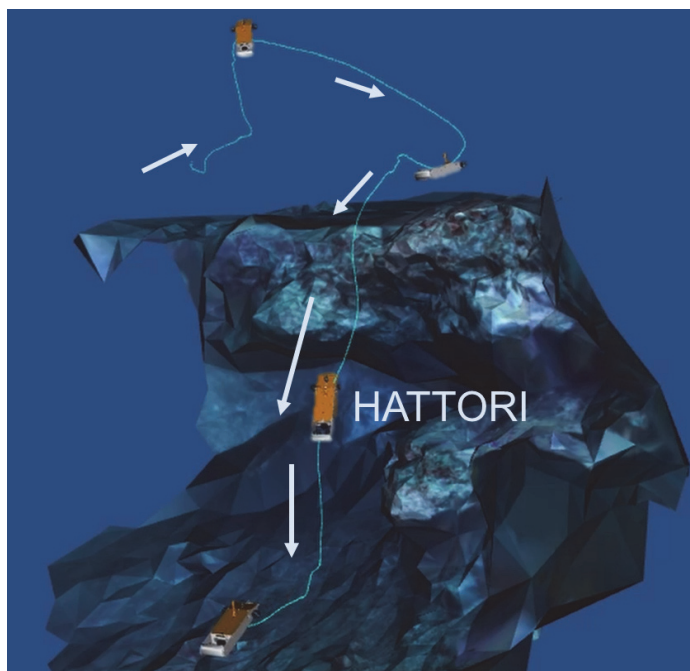


図 14. 崖下り中の HATTORI の航跡 (野口ほか、2021)

Figure 14. HATTORI's trajectory during cliff descent (Noguchi *et al.*, 2021)

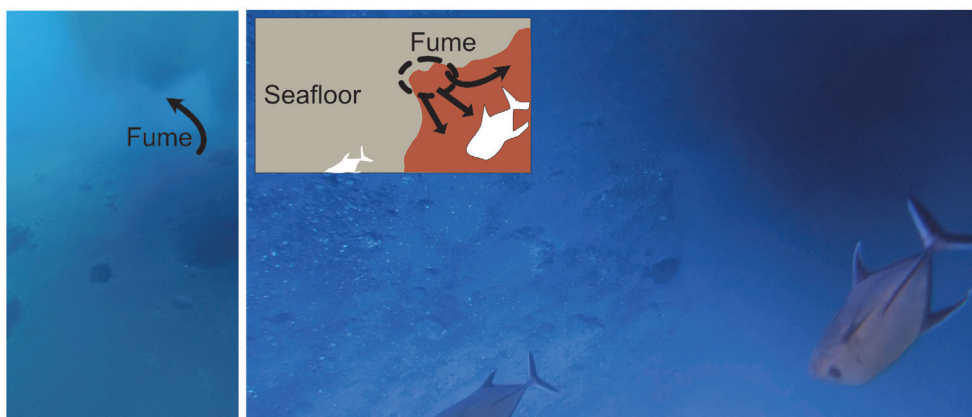


図 15. 海底から立ち上る噴気 (Dive 15、左：前向きカメラで横から撮影。右：下向きカメラで上から撮影。魚：カッポレ)

Figure 15. The fume rising from the seafloor (Dive 15, left: taken from the side with the forward-facing camera, right: taken from above with the downward-facing camera, fish: *Caranx lugubris*)

表 1. HATTORI の諸元

Table 1. HATTORI's specification

サイズ [m]	1.0 (L)×0.48 (W)×0.29 (H)
重量 [kg]	19
最大深度 [m]	300 (Osmo Action 装着時は 60)
スキャニングソナー	Tritech Micron
USBL	Blueprint Subsea SeaTrac X150
深度センサ	BlueRobotics Bar30
速度センサ	WaterLinked DVL A50 Performance
スラスタ	BlueRobotics T200 × 4
電池	Li-ion Battery 4S 18Ah
コンピュータ	Raspberry Pi 4
通信	Ethernet, Wi-Fi
カメラ	GoPro 6 Black, Paralenz Vaquita, Osmo Action×2

表 2. BUTTORI の諸元

Table 2. BUTTORI's specification

サイズ [m]	0.8 (L)×0.8 (W)×1.6 (H)
重量 [kg]	20
USBL	Blueprint Subsea SeaTrac X150
GNSS	Hemisphere GNSS V104s
スラスタ	BlueRobotics T200 × 3
電池	Li-ion Battery 4S 18Ah × 2
コンピュータ	AAEON Technology UP Board
通信	Ethernet, Wi-Fi

表 3. 潜航一覧

Table 3. Dive list

潜航 番号	潜航開始日時	ケーブル	潜航 時間 [s]	最大 深度 [m]	移動 距離 [m]	水平移動 距離 [m]	主な 底質
1	2021/7/9 9:37	テザー	212	18	82	51	砂
2	2021/7/9 9:59	テザー	213	22	86	48	砂
3	2021/7/9 10:06	テザー	208	20	97	61	砂
4	2021/7/9 10:12	テザー	211	19	94	61	砂
5	2021/7/9 12:13	釣り糸	325	22	178	125	砂
6	2021/7/9 12:47	釣り糸	338	24	232	191	砂
7	2021/7/9 13:58	釣り糸	322	24	97	47	砂
8	2021/7/9 14:38	釣り糸	397	24	137	91	砂
9	2021/7/10 7:14	釣り糸	243	42	110	41	岩
10	2021/7/10 8:16	釣り糸	253	51	122	42	岩
11	2021/7/10 8:44	無索	337	38	123	65	岩
12	2021/7/10 9:22	無索	330	26	110	67	岩
13	2021/7/10 10:35	無索	636	28	205	149	砂・岩
14	2021/7/10 11:14	無索	642	33	258	182	砂利 ・岩
15	2021/7/10 12:48	無索	960	48	376	285	砂・岩
16	2021/7/10 14:08	無索	649	31	256	184	砂・岩
17	2021/7/11 7:10	釣り糸	218	25	86	47	砂
18	2021/7/11 7:39	無索	450	24	157	109	砂
20	2021/7/11 8:25	無索	1,843	29	527	434	砂
21	2021/7/11 9:46	無索	1,888	59	831	718	砂・岩
22	2021/7/11 11:29	無索	348	27	167	122	砂
23	2021/7/12 7:35	釣り糸	218	26	70	28	砂
24	2021/7/12 8:30	無索	217	24	71	32	砂
25	2021/7/12 9:08	無索	220	26	75	33	砂
26	2021/7/12 10:21	釣り糸	219	25	80	42	砂
27	2021/7/12 10:41	釣り糸	223	27	76	34	砂

SUMMARY

Seafloor survey of Nishinoshima Island using an Autonomous Underwater Vehicle

Yukiyasu NOGUCHI^{1,2}, Yuki SEKIMORI¹ & Toshihiro MAKI^{*}

1. Institute of Industrial Science, The University of Tokyo, 4-6-1 Komaba, Meguro, Tokyo 153-8505, Japan.
2. Current affiliation: ROVCO LIMITED, Rovco, The Quorum, Bond Street South, Bristol, England, BS1 3AE, United Kingdom.

* maki@iis.u-tokyo.ac.jp (author for correspondence)

Nishinoshima Island is an uninhabited volcanic island in the Ogasawara Islands of Tokyo. While it is clear that the terrestrial part of the island was covered with lava and volcanic ash due to a large-scale eruption in 2020, the underwater part had not been surveyed yet, and it was unclear how far the lava and volcanic ash have spread and what the situation is for fish and benthic organisms. In July 2021, underwater and seafloor observations were carried out using a low-cost autonomous underwater vehicle system. Despite the strong currents, we succeeded in taking detailed optical images of the seafloor, including the steep topography. Volcanic ash was deposited on the seafloor in the northern part of Nishinoshima Island, and flat topography was observed. In the northeastern part of the seafloor, the fume emission was observed. In addition, several kinds of nektons, from large fish such as sharks to small fish and an octopus, were captured on HATTORI's camera.

Key words

ASV (Autonomous Surface Vehicle), AUV (Autonomous Underwater Vehicle), Fume, Image observation