

自律型海中ロボット「r2D4」のロタ海山への潜航

Exploration of NW Rota 1 Underwater Volcano by Autonomous Underwater Vehicle "r2D4"

浦 環*・浅田 昭*・小原 敬史**・永橋 賢司**・坂巻 隆*・
 能勢 義昭*・金 岡 秀*・大藪 祐司***・杉松 治美*・小山 寿史*

Tamaki URA, Akira ASADA, Takashi OBARA, Kenji NAGAHASHI, Takashi SAKAMAKI,
 Yoshiaki NOSE, Kangsoo KIM, Yuji OYABU, Harumi SUGIMATSU and Toshifumi KOYAMA

1. 自律型海中ロボット「r2D4」

アールツー計画で研究開発している自律型海中ロボット「r2D4」¹⁾は2003年7月に完成し(図1, 2, 表1参照), 駿河湾にて最初の試験的な潜航をおこなった。引き続き同月, 佐渡島両津港沖で観測および機器の調整をおこない, 12月に黒島海丘(東経124度10分, 北緯24度7分, 深度620m)²⁾へ潜航し, 2004年5月には活発な火山活動³⁾が伝えられているマリアナ海域の北西ロタ第一海底火山(北緯14度36分, 東経144度46分, 深度521m, 図3参照)へ潜航した(表2参照)。ロタ海山は富士山型の山容(図4参照)である。



図1 潜航が終わって白鳳丸への揚収される「r2D4」

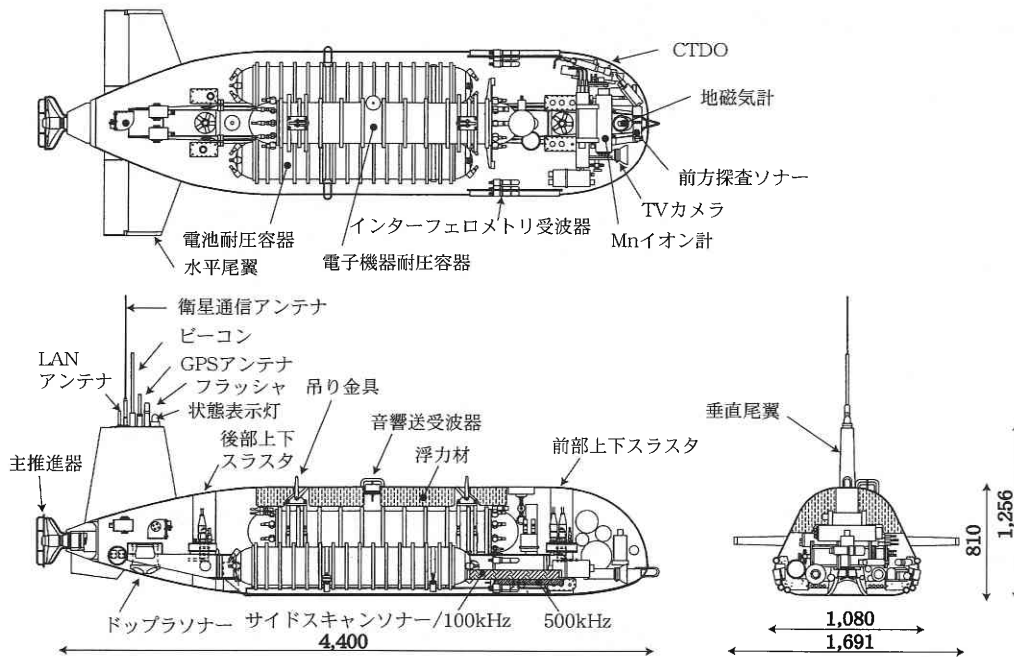


図2 「r2D4」の一般配置図

*東京大学生産技術研究所 海中工学研究センター

**三井造船株式会社

*** (株) スイフトスタッフ

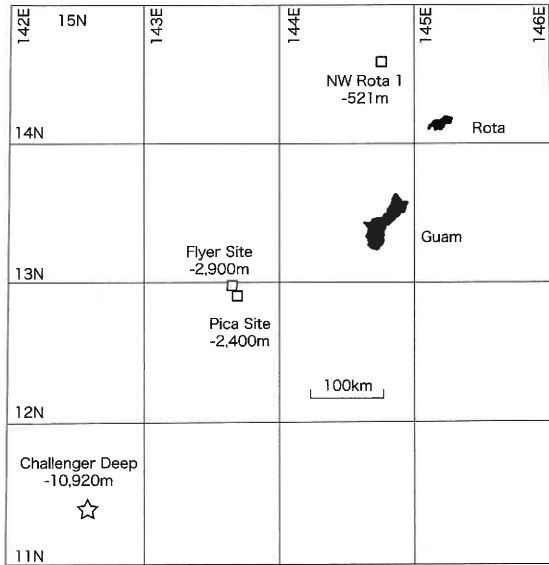


図3 マリアナ海域

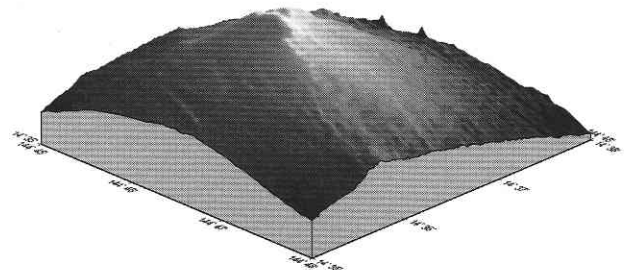


図4 北西ロタ第一海底火山の山容。深度データは共同研究者の東京大学海洋研究所田村千織氏によりKH04-2にて計測

表1 「r2D4」の主要目等

全長	4.4m
胴体長	1.08m
胴体幅	0.81m
乾燥重量	1.63 ton
最大潜航深度	4,000m
航続距離	60km
二次電池	リチウムイオン
二次電池容量	15kWh
航海速度	3 knots
主CPU	Power PC 233MHz
OS	VxWorks
航法装置	INS(FOG)+DVL

表2 潜航一覧表

潜航番号	年	月	日	潜航場所名称	潜航開始(時刻は日本時間)			浮上時刻	潜水時間	総潜水時間	最大潜航深度	目的	備考
					緯度	経度	時刻						
1	2003	7	7	駿河湾奥	35:04:11N	138:49:15E	10:26	11:01	0:35	0:35	188	総合試験	
2	2003	7	7	駿河湾奥	35:04:13N	138:49:19E	11:13	12:24	1:11	1:46	413	大陸棚斜面観測	コネクタ漏水で途中浮上
3	2003	7	15	佐渡両津湾	38:05:54N	138:28:34E	12:10	14:06	1:56	3:42	266	湾中央部で調整	高度30m・完遂
4	2003	7	18	佐渡両津湾	38:06:35N	138:28:38E	11:59	16:43	4:44	8:26	502	断層に沿った観測	高度30m・完遂
5	2003	7	19	佐渡両津湾	38:06:15N	138:28:00E	10:37	14:36	3:59	12:25	388	断層に沿った観測	高度15m・完遂
6	2003	12	15	相模海丘	35:09:09N	139:24:01E	11:59	12:56	0:57	13:22	426	INS・音響装置調整	
7	2003	12	15	相模海丘	35:09:02N	139:24:07E	13:12	13:19	0:07	13:29	69	Gain調整	
8	2003	12	18	黒島海丘	24:07:27N	124:09:51E	13:15	16:16	3:01	16:30	626	冷水湧水観測	626m定深度・完遂
9	2003	12	20	黒島海丘	24:06:50N	124:09:39E	8:36	9:50	1:14	17:44	631	冷水湧水観測	INS Update/バグで途中浮上
10	2003	12	21	黒島海丘	24:06:33N	124:09:59E	9:34	10:03	0:29	18:13	629	冷水湧水観測	海底に接近して途中浮上
11	2003	12	21	黒島海丘	24:07:22N	124:09:52E	11:32	14:22	2:50	21:03	663	冷水湧水観測	高度20m・完遂
12	2004	5	28	Flyer Site	12:57:29N	143:35:46E	13:55	17:43	3:47	24:50	2,089	熱水観測	ラダー-FB異常で途中浮上
13	2004	5	30	NW Rota 1	14:36:07N	144:46:56E	5:16	6:25	1:08	25:59	635	海底火山観測	高度アラームで途中浮上
14	2004	5	30	NW Rota 1	14:36:25N	144:46:20E	7:27	9:14	1:46	27:46	600	海底火山観測	高度アラームで途中浮上
15	2004	5	30	NW Rota 1	14:36:00N	144:46:43E	10:20	14:55	4:35	32:21	588	海底火山観測	定深度:完遂
16	2004	5	31	NW Rota 1	14:36:01N	144:46:58E	6:53	13:36	6:43	39:04	1,400	海底火山観測	パンジージャンプ:完遂
17	2004	6	1	NW Rota 1	14:36:09N	144:46:54E	5:20	5:29	0:08	39:13	30	上下スラスト調整	
18	2004	6	1	NW Rota 1	14:36:29N	144:47:01E	8:02	8:17	0:14	39:28	125	海底火山観測	INS Vz異常で途中浮上
19	2004	6	1	NW Rota 1	14:36:20N	144:46:44E	12:36	14:57	2:20	41:48	586	海底火山観測	左ELV異常、強制浮上

2. マリアナ海域の観測企画

「r2D4」はプロジェクト開始当初より、マリアナ海域の熱水地帯の調査を第一の目標として掲げてきた。このため、最大潜航深度を4,000 m仕様としている。本テーマは白鳳丸(JAMSTEC所属)KH04-2(主席研究員塚本勝巳教授)のレグ2航海に採用された。2004年5月27日、グアム島アプラ港を出港し、マリアナ海域においてロボットの調整を含めて8回の潜航をおこない(表2参照)、6月3日に同港に帰港した。

当初計画では、Flyer Site(北緯12度57分, 東経143度37分, 水深約2,900 m)およびPica Site(北緯12度55分, 東経143度39分, 水深約2,400 m)への潜航を予定していたが、米国のNOAAのグループから北西ロタ第一海底火山のマグマ活動が活発であるとの情報³⁾を得ていたこと、またFlyer Siteでの#12潜航において2,000 mを越える深度に潜航した際に「r2D4」のラダーに異常信号が出たこと、以上2点を考慮して、北西ロタ第一海底火山への潜航に集中した。

3. ロタ海底火山潜航

ロボットは、白鳳丸を支援船として山頂周辺および1,400 m深度にある丘をサイドスキャンソナーや現場型化学分析装置などの観測機器を用いて観測した。搭載するセンサ類の観測データ解析結果については、それぞれの担当から報告するため、ここでは各潜航におけるロボット行動に話を絞る。潜航航路は、垂直スラストの調整試験である#17潜航を除く全ての潜航において、頂上西側の台地へと東側より降下し、200 m以下の高度として頂上周辺を航行する航路を計画した。なお、#18潜航はINSからの出力に異常値が出たので、潜航開始直後に潜航を中止して浮上している。

#13潜航：頂上に到達して西側へ移動した後、東へと進む際に、西側の崖縁に接近しすぎたために、ミッションを

中断して垂直浮上する。崖に向かうときの計画に難点があったことによる。なお、4節で述べるSSBLによる位置修正を初めておこなう。

#14潜航：#13潜航の計画を変更して、西側へ出た場合の対策を講じて再度潜航させる。山頂上を120 mの一定高度維持航法で約45分航行した後、頂上の東側に出て西に進むときに、東側の崖縁に接近しすぎたために、ミッションを中断して垂直浮上する。最接近点において高いMn濃度を計測。

#15潜航：2度にわたる異常海底接近を反省し、サイドスキャンソナーによる観測にのみ重点を置く計画に変更。航法を480 mと400 mの一定深度維持に変更し、頂上周囲の同じコースを2段階の深度にて航行し観測する。Mn濃度の異常値を数カ所で計測する。なお、コースデータの変更は、ロボットが浮上した状態で無線LANを用いて速やかにおこなうことができるため、#13から#15の3度の潜航は、同じ日におこなわれている。

#16潜航：頂上付近から南側の崖下へと25度の角度で降下し、同時に東側1,400 mの深度にあるこぶを観測。Brimstone Pitと呼ばれる南側のカルデラにも高い濃度のMnを計測。計画図および深度・高度の時間変化を図5および図6に示す。深度510 mから400 mの間を上下して3次元的な計測を可能にする潜航をおこなった後に、「r2D4」は山頂から南側の崖の下へと最大角度25度で5回にわたって急降下し、さらに1,400 m深度にある丘へと潜航し、浮上している。浮上直前、図5中の航路点40の300 m深度において、磁力計のキャリブレーションのために水平面に八の字型の軌跡を描く行動をおこなった。ロボットが山頂付近を航行したときに、熱水プルームを何度かにわたって貫通した。頂部から崖下への「ジャンプ」は安全性が高く、急峻な海底火山の観測に有効であることが分かった。

#19潜航：頂上の東側の肩を集中的に観測し、また、鉛直下降上昇することにより海底面に接近することを目論んだが、途中にて左エレベータアクチュエータに不具合が発生し、行動に異常をきたしたので、コマンドにより強制浮

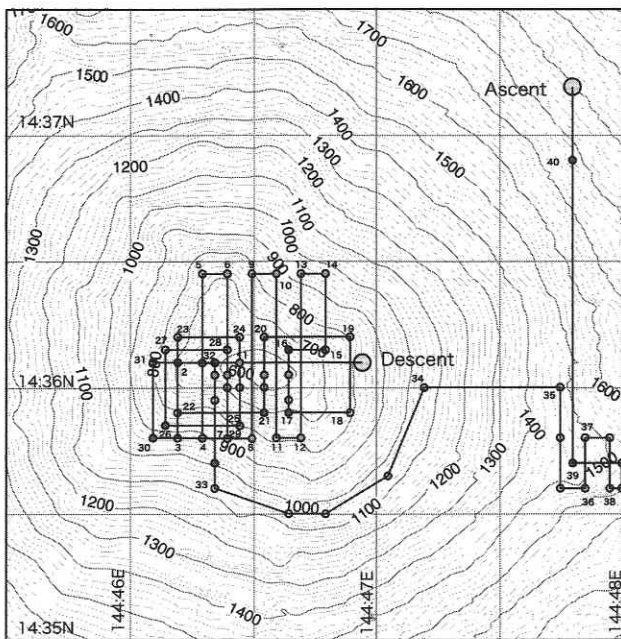


図5 ロタ海底火山#16潜航計画図

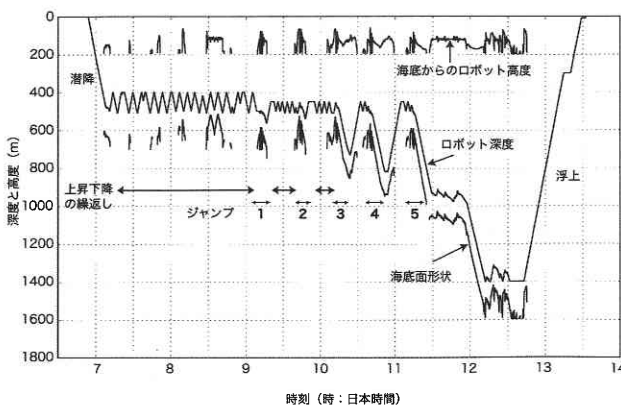


図6 ロタ海底火山#16潜航航跡の鉛直プロフィール



図7 「r2D4」が撮影したプルーム

研究速報

上させる。なお、これまでの潜航では、エネルギー節約のためにTVカメラによる撮影はおこなっていなかったが、#19潜航では、頂上付近に達したところで、ロボットの底部にある下向きカメラとストロボを作動させて撮影をおこなった。1秒1コマで、断続的に約60分間にわたり撮影したが、ロボットは山頂付近でブルームを貫いて潜航しており、ブルームの様子を撮影することに成功した(図7)。

4. 位置精度の確保

大深度への潜航は、位置精度が問題となる。これは、慣性航法装置(INS)の誤差修正をおこなうドップラソナーが計測できる対地速度の最大高度が200mであることによる。200mを超える水深地点から潜航を開始する場合には、高度が200mになるまでは対地速度の代わりに対水速度を参照せざるを得ない。そのため、流速分の誤差が位置情報に蓄積する。そこで、海底に指標となるランドマークがない状況における誤差修正のための手法を開発した。

その手法とは、ロボットの航路計画をたてる際に、対地速度が計測できる高度200m以下まで「r2D4」が潜航し

た段階で、SSBLによる誤差修正のために等緯度線および等経度線に沿ってカギの字型の計画航路を組み入れるというものである。支援船からは、SSBLにより「r2D4」の位置を計測し、図8に示すように予定航路との差を平均的に求めて、蓄積したISN誤差を推定することができる。このデータを音響通信装置により「r2D4」に送り、誤差をキャンセルする。なお、「r2D4」はINSデータにより予定直線航路を忠実に追従していると仮定する。

本手法は、黒島海丘潜航の際に開発されて実経路の推定に利用された。ロタ海底火山における潜航では、誤差をロボットに送り、INSのアップデートをおこなうなど実際に活用されている。#16潜航において修正された航跡を図4にかぶせて図9に3次元的に表示する。

5. 終わりに

ロタにおける潜航の結果、現在のところ「r2D4」は大深度潜航に関しては解決すべき機械的な問題があるが、航法においては計画された行動を十分におこなえることが立証された。平成17年度以降は、伊豆小笠原での海山の調査、マリアナ海域の再度の調査、インド洋中央海嶺の三重点の調査を計画しており、今回の成果をもとにロボット機能に改良を加えて、熱水地帯の解明に挑戦していく。

本稿では、KH04-2の航海でのロボット行動を示した。これらの潜航の成功は、アールツ計画の関係者ばかりでなく、白鳳丸の乗組員の方々を含め多くの方々のご支援・ご援助の賜である。特に、本航海は、白鳳丸が東京大学海洋研究所から海洋研究開発機構へと所属が替わった最初の航海であるため、両組織の事務の方々に潜航支援のためのご尽力を賜った。また、白鳳丸へのSSBL装置の取り付けについて、海洋研究所の徳山英一教授、磨田徹氏を始めとする三菱重工業(株)の方々、村上英幸氏を始めとする海洋電子(株)の方々のご協力を賜った。ここに厚く感謝する次第である。

なお、本研究は、文部科学省科学研究費学術創成研究を基礎としておこなわれている。

(2004年9月8日受理)

参考文献

- 1) 浦 環：“新しい自律型海中ロボットで熱水地帯をくまなく探る—ここに至るまでの成果と音響工学的な課題—”，海洋音響学会誌，Vol. 29, No. 4, (2002.10)，pp. 225-232.
- 2) 浦 環：“自律型海中ロボットr2D4の製作と佐渡沖および黒島海丘海底観測”，日本ロボット学会誌，Vol. 22, No. 6, (2004.9)，pp. 709-713
- 3) <http://oceanexplorer.noaa.gov/explorations/04fire/welcome.html>

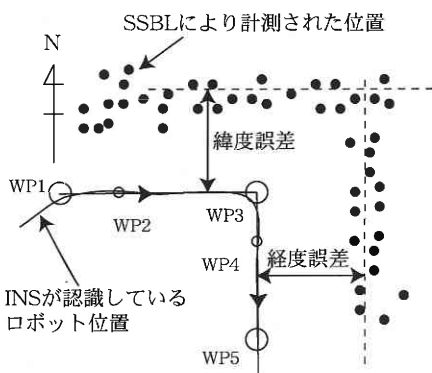


図8 誤差修正法

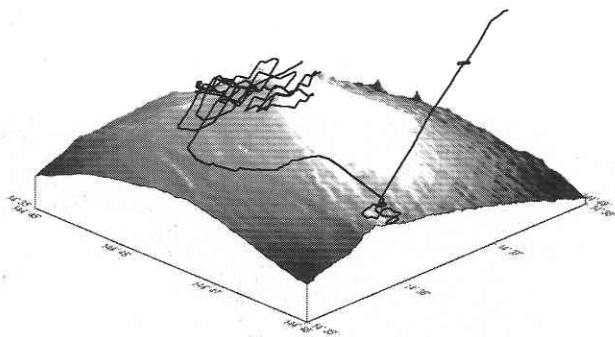


図9 位置を修正したロタ海底火山#16潜航航跡図