

2007年1月9日

自律型海中ロボット「r 2 D 4」深海溶岩大平原を発見

白鳳丸航海 KH-06-4 Leg 3 2006.12.7-23

インド洋中央海嶺調査チーム

東京大学工学系研究科、同生産技術研究所海中工学研究センターおよび同海洋研究所を中心とするインド洋中央海嶺調査チームは、海中工学研究センターが開発した自律型海中ロボット（AUV：Autonomous Underwater Vehicle）「r 2 D 4」をロドリゲス島の沖合約 200km の中央海嶺にて潜航させ、インド洋最大、世界最大規模の溶岩平原とそれにとまなう熱水活動を発見しました。

1. 概要

本チームのメンバーの一人である蒲生俊敬教授のグループがロドリゲス三重点において最初に熱水湧出を発見したのが 2000 年であることから分かるように、インド洋を南北に縦断する中央海嶺は、日本や欧米諸国から遠く離れているために、研究が遅れているといっただけでしょう。日本のグループついでアメリカのグループが発見した 2 カ所以外にも熱水活動があることは予想はされていますが、具体的な発見はなされていません。

東京大学大学院工学系研究科地球システム専攻玉木賢策教授を主席とするチーム（表 1 参照）は、白鳳丸（船長稲葉不二夫氏、海洋研究開発機構所属）に乗船し、インド洋中央海嶺セグメント 15 および 16（図 1、図 2 参照）をターゲットとし、最新鋭の自律型海中ロボット（注 1 参照）「r 2 D 4」（図 3、図 4、注 2、注 3 参照）を投入して、2006 年 12 月 7 日から 23 日まで、ロボットに搭載されている計測器（注 4 参照）を用いて広範囲の観測活動をおこないました。観測結果の詳細な解析は、現在進行中ですが、自律型海中ロボット「r 2 D 4」はセグメント 16 に溶岩大平原（ドードー溶岩大平原と仮称しました）を発見し、また、その調査の過程で、熱水プルームの観測に成功しました。ロボットによる潜航成果をもとに、従来の手法による研究船からの観測を進めることで、マントルがわき出し火山活動をひきおこす中央海嶺の新たな実態を解明することができました。

2. 発見の概要

セグメント15およびセグメント16は、東経60度付近を南緯18度0分から南緯20度20分まで延びる、延長約280kmのインド洋中央海嶺の一部です。まず、ロボットの支援船である白鳳丸は、装備しているマルチナロービームソナーで、海域の海底形状の観測を精力的におこないました。

次にロボット潜航です。ロボットはレユニオン島・ロドリゲス島と連なる地形の高まりの線と海嶺中軸谷との交点、セグメント15の中央付近西側に広がるロジェ高地（仮名：南緯19度30分、東経65度50分付近）に最初集中的に潜り、観測をしました。ロボットはMn濃度の異常などを観測しましたが、ロボット潜航後に支援船からCTDO装置を吊り降ろしておこなった調査などでは大きな成果を得ることができませんでした。

ついでロボットは、セグメント16の中軸谷が細くなっている部分（南緯18度25分、東経65度20分付近、図5参照）に潜り、サイドスキャンソナーやインターフェロメトリソナーなどにより、そこに平坦で広大な溶岩平原の広がりがあることを発見しました。これを、モーリシャスのシンボル「ドーデー鳥」にあやかっ、ドーデー溶岩大平原と名付けました（仮称）。また、Mn濃度や濁度の異常がある場所を発見しました。潜航後のCTDO装置による観測などにより、ロボットが発見した場所の周囲の海水環境などが詳しく調べられ、熱水の湧出の確かな証拠を得ました。

3. 潜航の概要

溶岩平原を発見した第32潜航（図6、図7、注5参照）においてロボットは、朝7時32分（モーリシャス時刻）に潜航を開始し、図7の航路計画（注6参照）に従って、まず、谷を形成している東側の峰（仮称東プース岳）約2,400m深度へと降り、そこから約300mのほとんど垂直の崖下へとジャンプしました。谷底を、深度を維持あるいは高度を維持しながら、南緯18度19分から南緯18度27分の間を一往復し、各種計測をおこない、午後3時前に溶岩平原を離れ、午後4時6分に西側の峰（仮称西プース岳）付近へと浮上しました。潜水時間は8時間33分、その内、海底に滞在していた時間は約6時間半です。

図8は、ロボットの深度、ロボット位置での海底の深度とロボット高度、各イベントの発生時刻を表しています。

図9は、ロボットが撮影した溶岩大平原のサイドスキャン映像です。所々に岩の露出が見られますが、ほとんどの場所は「真っ平ら」な平原を形成していることが見受けられます。図10は中央部分の拡大図で、真っ平らな平原の中に、拡大軸の方向に何本かの亀裂が走っているのが見られます。

ロボットは、平原の北部、嘴岩（通称）付近（図11参照）において高いマンガニオン濃度（注7参照）および濁度の急激な変化（図12参照）を観測しました。

ロボット展開後、船上から CTD0 装置を下ろし、嘴岩周辺の観測をおこない、熱水が嘴岩付近から湧出していることの確証を得ました。

4. 溶岩大平原

本溶岩大平原は、ロボットが観測してきたデータおよびマルチナロービームソナーや、ロックコアのデータにより、

長さ約 26km、幅約 2.7km、体積約 16km³（推定）

の規模で、その中央の真っ平らな部分は、

水深約 2,700m、長さ約 14km、溶岩の厚さ約 300m（推定）

です。

詳細な解析や分析は現在進行中ですが、これはインド洋最大の溶岩台地であるばかりでなく、世界最大級の海底溶岩台地（注8）とあってよいでしょう。

4. インド洋中央海嶺の今後の観測活動

自律型海中ロボットが発見した局所的な異常点に、ROV（Remotely Operated Vehicle）や有人潜水艇を潜水させることで、より詳細な熱水活動の情報を得ようと考えています。つまり、自律型海中ロボットによる広域観測と ROV や有人潜水艇による詳細観測というように、最先端技術を巧みに組み合わせて効率的な観測システムを構築していくことが、今後の日本の海中海底観測の推進にとって必要であると思います。

5. ロボットの今後の観測活動

今回の潜航で、「r 2 D 4」は、険しい崖に挟まれた狭い谷の中への潜航に成功し、そこに溶岩大平原を発見して熱水プルームなどの観測をおこなうことができ、熱水性鉱床の存在の可能性を導きました。これらの成果をもとにして、今後ロボット性能と知能および展開方法をさらに改良し、より挑戦的な潜航を目指したいと考えています。

現在、「r 2 D 4」を用いた観測計画で確定しているものについては以下のものです。

2007 年度： 伊豆半島沖精密海底測地（海上保安庁と共同）
明神礁カルデラ観測（JAMSTEC「なつしま」）

6. 本件についての問い合わせ先

連絡先： 東京大学生産技術研究所海中工学研究センター
センター長、教授 浦 環
〒153-8505 東京都目黒区駒場 4- 6- 1
電 話：0 3- 5 4 5 2- 6 4 8 7
ファクス：0 3- 5 4 5 2- 6 4 8 8
E-mail：ura@iis.u-tokyo.ac.jp
ホームページ：http://underwater.iis.u-tokyo.ac.jp

注1：エネルギーを内蔵し、センサ情報を基にして搭載されたプログラムで自動的に潜航する無索無人潜水機。AUV (Autonomous Underwater Vehicle) と呼ばれます。無人潜水機は、通信と電力補給のためのケーブルで母船と繋いで遠隔操縦をする有索無人潜水機 ROV (Remotely Operated Vehicle) が現在は主流ですが、昨今は、索のない AUV の利用が進みつつあります。深海用の ROV はケーブルを取り扱う装置が大きなものとなり、船上施設や作業が簡単ではありません。

注2：2001 年度から 5 年間の計画で、熱水地帯を集中的に観測できる新しい深海知能ロボット「r 2 D 4」を開発し、これを用いてマリアナ海域などの観測をおこなうプロジェクト「アールツー計画 (R-Two Project)」がスタートしました。このプロジェクトは、日本学術振興会の学術創成研究「深海知能ロボットの開発研究」の一環としておこなわれたものです。

r は中央海嶺を意味する Ridge System から来ています。その第一期計画がアールワン計画で、本計画は第二期なのでアールツー計画と呼んでいます。「D4」は最大潜航深度 (Depth) が 4,000m であることを意味します。

2003 年 7 月に「r 2 D 4」のハードウェアおよび基本的なソフトウェアの開発が完了 (製造：三井造船 (株))、7 月 7 日に駿河湾北部において潜航、引き続き 7 月 15 日～19 日には日本海佐渡沖に、12 月には相模海丘および黒島海丘で、2004 年 5 月にはグアム島沖のマリアナトラフにあるロタ北西第一海底火山において、2005 年 8 月には明神礁カルデラへの潜航に成功しています。

注3：「r 2 D 4」の特徴 (主要目性能については配布資料 2「生研リーフレット」参照)

- ・小型軽量 (全長 4.4m、空中重量 1.6 トン)
大型の支援船を必要とせず、また支援船を特定しない
全自動の潜水機であり、操縦者を必要としない

- ・ 自己完結型
 - トランスポンダ設置などの支援が不必要
 - 高精度位置標定が可能（光ファイバジャイロとドップラーソナー）
 - 高い信頼性と十分な安全対策
- ・ 観測用センサからのデータをロボットの頭脳への取り込み
 - 複雑な環境の変化を認識する
- ・ 観測経路のダイナミックな変更
 - 特異点の発見があったときに、その原因を探る探索活動

注4：「r 2 D 4」には観測用に各種センサが取り付けられています。これらからの出力を利用して熱水地帯の観測に知的な行動システムをどのように確立させるかを検討することも今回の潜航の目的の一つです。今回搭載している観測機器は、以下のものです。

- ・ テレビカメラ
- ・ サイドスキャンソナー
- ・ インターフェロメトリソナー
- ・ 電気伝導度計
- ・ 温度計
- ・ 磁力計
- ・ 酸素濃度計
- ・ マンガンイオン濃度計
- ・ 濁度計

音響観測装置のサイドスキャンソナーやインターフェロメトリソナーは、地形の3次元的情報を得るための強力な装置です。「r 2 D 4」は、運動が安定しているので、解像度の良い情報が得られます。インターフェロメトリソナーでは1 m以下の精度で海底面の凹凸が計れます。

マンガンイオン濃度計は、熱水プルームの発見のための強力な武器です。

注5：「r 2 D 4」の潜航番号は2003年7月の初潜航時の#1に始まる通し番号です。

注6： 「r 2 D 4」は、潜航直前に、緯度、経度、深度で表された航路点 (Way Point) および航路点間の行動様式が書かれた潜航計画表を受け取ります。海面上の「r 2 D 4」は潜航開始の指示を無線で受けるとこの計画表に従って潜航します。障害物を回避する行動や自身の状態をモニターして行動計画を変更することに関して、「r 2 D 4」はオペレータの指示を仰ぐことはせず、自ら決定して潜航をおこないます。したがって、支援母船上の我々は、「r 2 D 4」に取り付けられた音響発信器 (トランスポンダ) からくる

信号により「r 2 D 4」の位置を把握し、帰ってくることを待つだけです。

「r 2 D 4」の内部状態は、音響通信装置を使ってモニターすることができます。しかし、それは、支援母船上の我々が安心するためにのみ使い、緊急の場合（例えば海況が急に悪くなって浮上しなければならない場合）や、「r 2 D 4」の慣性航法装置に誤差がたまってきて位置誤差を補正する必要がある場合など以外に、我々は「r 2 D 4」に何かを命令することはありません。これは、まさに「ロボット」といえるでしょう。

注7：熱水性鉱床を形成する熱水には、いわゆる温泉水とは違って高い濃度のマンガンイオンが含まれます。これを計測することにより、熱水活動の存在を検証することができます。2004年のロタ海底火山の観測潜航や2005年の明神礁カルデラへの潜航においても、これにより熱水活動を確認しています。

注8：2004年、(独)海洋研究開発機構が実施した太平洋大航海において、南緯14度西経112度の海域で、面積340km²、容積20km³の溶岩流を発見しています。ただし、これは東太平洋海膨の海嶺中心軸から離れた場所です。

配布資料

表1 KH06-4 Leg 3 (2006 Dec. 7-23)乗船研究者一覧表

- 1 インド洋中央海嶺セグメント15、16の位置
- 2 セグメント15、16の海底形状（白鳳丸から今回計測したデータの一部）
- 3 「r 2 D 4」の写真
- 4 「r 2 D 4」の一般配置図
- 5 ドードー溶岩大平原の海底形状拡大図（白鳳丸から今回計測したデータの一部）
- 6 ドードー溶岩大平原への#32潜航の計画図
- 7 ドードー溶岩大平原への#32潜航の平面図（2006年12月19日実施）
- 8 ドードー溶岩大平原への#32潜航の深度図。横軸は日本時刻で、モーリシャス時間は、これに5時間を引きます。
- 9 サイドスキャンソナーより撮影された溶岩大平原
- 10 溶岩大平原の拡大写真
- 11 r 2 D 4搭載の現場型マンガン分析装置により計測された強いマンガン異常の位置
- 12 r 2 D 4搭載の現場型マンガン分析装置によるマンガン異常

表1 KH06-4 Leg 3 (2006 Dec. 7-23)乗船研究者一覧表

主席	玉木賢策	東京大学大学院工学系研究科
AUV班	浦 環 (班長)	東京大学生産技術研究所
	浅田 昭	東京大学生産技術研究所
	韓 軍	東京大学生産技術研究所
	坂巻 隆	東京大学生産技術研究所
	小山寿史	東京大学生産技術研究所
	永橋賢司	(株) 三井造船
	中根健志	(株) 三井造船
	小幡忠正	(株) シーテック
	大藪祐司	(株) コスモ情報システム
	山岡紀夫	(株) コスモ情報システム
	近松信幸	(株) ワールド・オーシャン
化学班	蒲生俊敬 (班長)	東京大学海洋研究所
	岡村 慶	高知大学海洋コア総合センター
	清田 馨	東京大学海洋研究所
	川口慎介	東京大学海洋研究所
	今井圭理	東京大学海洋研究所
	小熊健治	東京大学海洋研究所
	茂木勝郎	東京大学大学院工学系研究科
	森口恵美	東京大学大学院工学系研究科
	Asha Poonyth	モーリシャス海洋研究所
	Douglas Connelly	サザンプトン海洋センター
Cedric Boulart	サザンプトン海洋センター	
シービーム班		
	沖野郷子 (班長)	東京大学海洋研究所
	Desiderius Masalu	ダルエスサラーム大学
	市川泰士	東京大学大学院工学系研究科
	西澤慎也	東京大学工学部
	Dass Bissessur	モーリシャス海洋研究所
岩石班	折橋裕二 (班長)	東京大学地震研究所
	Marco Magnani	東京大学地震研究所
	吉田和弘	(株) マリンワークスジャパン

以上