

「海洋生物多様性および生態系の保全・再生に資する基盤技術の創出」
平成 23年度採択研究代表者

H24 年度
実績報告

浦 環

東京大学・生産技術研究所・教授

センチメートル海底地形図と海底モザイク画像を基礎として生物サンプリングを行う自律型海中
ロボット部隊の創出

§1. 研究実施体制

(1)「ロボット部隊」グループ

① 研究代表者: 浦 環 (東京大学生産技術研究所、教授)

② 研究項目

- ・ 研究総括
- ・ ロボット部隊編成と展開
- ・ 海底センシング技術開発
- ・ 海底モザイクング技術開発

(2)「サンプリング」グループ

① 主たる共同研究者: 石井 和男 (九州工業大学大学院生命体工学研究科、教授)

② 研究項目

海底サンプリング技術開発

(3)「生物」グループ

① 主たる共同研究者: 丸山 正 (海洋研究開発機構・地球情報研究センター、プログラムディレクター)

② 研究項目

- ・ 自律型海中ロボットの生物サンプリングに向けた生物多様性の把握
- ・ 自律型海中ロボットの生物サンプリングに向けた深海生物 3D モデリング化の検討
- ・ 捕獲生物の同定のための DNA バーコーディング手法の検討

(4)「熱水」グループ

① 主たる共同研究者: 沖野 郷子 (東京大学大気海洋研究所、准教授)

② 研究項目

自律型海中ロボットによる底熱水域の三次元高解像度環境調査手法の開発

§2. 研究実施内容

(1)「ロボット部隊」グループ:A

・研究総括に関しては、本研究課題の総合的に推進し、初年度成果を受け、今年度から最終年度までを見通した研究全体のフレームワークを検討した。各グループ間の連携を図り、研究情報交換を行い、研究計画を練り、研究課題全体の進捗状況を確認しつつ計画の将来展望を検討した。

・ロボット部隊編成と展開に関しては、熱水域および周辺環境の多様なパラメタを効率的に計測することを目的として、本クレスト課題が目標としているタイプの異なる複数 AUV(航行型とホバリング型)を同時に海域展開の第一段階として 3 台の AUV を海域展開し、自律潜航させるミッションを策定。AUV のハードウェアの整備・改良および高精度で安全な同時展開と揚収に必要な通信手法、測位手法、時刻同期手法の開発を行った。実海域での展開により、複数 AUV 同時展開によるシステムチックな熱水域環境計測システムの基礎を構築し、今後の熱水域の広域での高効率で高精度な計測に必要なプラットフォームボディと知能原型を形成した。

2012 年 11 月に実施した海洋研究開発機構の航海 KY12-13 では、航行型 AUV AE2000a と AE2000f およびホバリング型 AUV TUNA-SAND の計 3 台を、スミスカルデラに同時展開し、自律潜航させることに成功した。サイドスキャンソナーを備える AE2000a が計測した海底地形データより、カルデラ内に活動を停止している熱水マウンド状の地形を発見したが、化学センサを備える AE2000f によるマウンド周囲の海水の計測結果には、熱水が噴き出している徴候が見られず、このため、活動を停止した熱水マウンドと推定される(図 1 参照)。

・海底センシング技術開発に関しては、海底底生生物の分布を広範囲にわたり、ハビタットスケールで可視化するセンシング技術を実現することを目的に研究開発を行い、10m 以上の高い高度から 3D カラー画像を広域できる計測システムを開発した。生物チームとの連携により、2 回の実海域調査を実施、開発したシステムを ROV に搭載し、ハビタットスケールの広い範囲のマッピングに成功。今後、AUV に搭載することによって効率的なサンプリング戦略の基となるハビタットマップを取得するための基礎を構成した。

海洋研究開発機構の航海 NT12-15 では、相模湾における水深 500m の鯨骨サイトのマッピングを実施した。6m 程度の長さの鯨骨とその周辺海域を調査し、3D データから鯨骨のボリュームを算出することに成功(図 2 参照)、広い範囲を可視化することによって鯨骨の周りの生物と生物が広がる範囲を明らかにした。これを基に、生物チームは鯨遺骸軟組織の容積変化の推定を行った。次に、NT12-27 航海では、伊平屋北における水深 1,000m の人工熱水噴出サイトにおいて、平均高度 10m 以上の高高度から、1 時間あたり 8,000m² の広範囲の 3D 画像マッピングデータを取得することに成功した。3 つの人工熱水チムニーと伊平屋北最大の熱水チムニー及び周辺海域を可視化し、熱水生成物ハビタットの分布及び密集度を明らかにした。今後、特徴的な海域において継続的に調査を実施することで、生物の多様性と分布範囲の変化を定量的に計測・評価できると期待される。

・海底モザイクング技術開発においては、AUV により起伏のある海底面の 3次元画像マッピングを実現することを目的として、AUV のナビゲーション手法および後処理手法の両面について研究

開発を実施した。AUVのナビゲーション手法としてはスキャニングソーナーとシートレーザーによる水中障害物の自動探知手法を提案し、水槽試験によりその有効性を確認した。また、平成23年度に開発した再観測経路生成手法をAUV Tri-TONに実装し、相模湾および鹿児島湾への展開を通してその有効性を確認した(図3参照)。後処理手法については、AUVが取得する膨大な画像データを処理するための計算機環境を構築し、光切断による地形計測のノイズ除去アルゴリズムを改良することで、数万×数万ピクセル規模のデータを扱えるようにした。

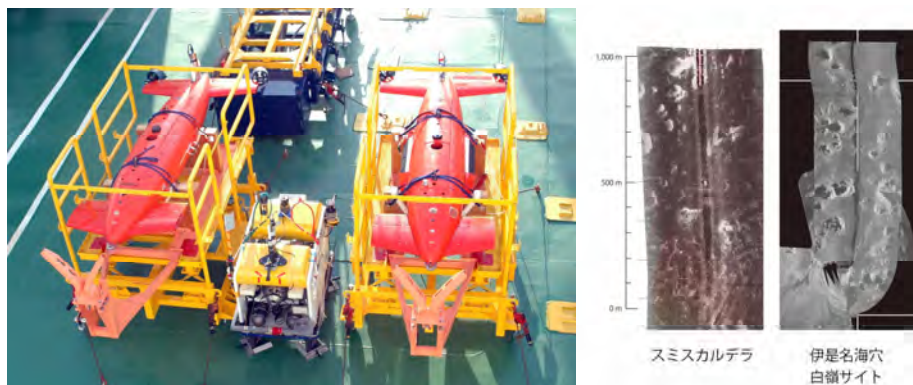


図1 (左) 3台AUV(左からAE2000f、TUNA-SAND、AE2000a) (右)スミスカルデラ中央部の海底の起伏(AE2000a撮影)と2008年r2D4が撮影した伊是名海穴白嶺サイト(熱水湧出地帯)の比較

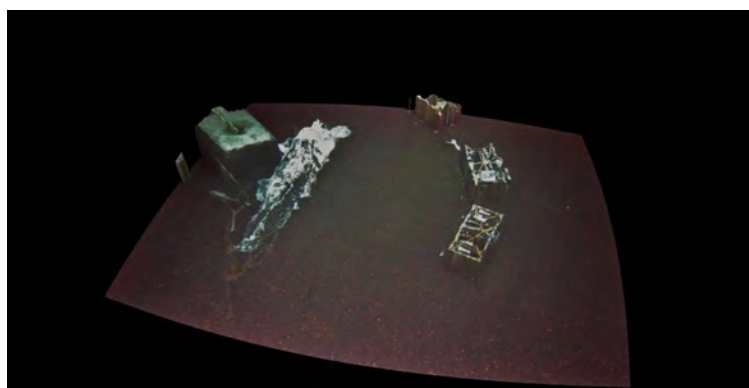


図2 マッコウクジラ遺骸の3Dデータ、高高度化により広領域3D画像情報を取得

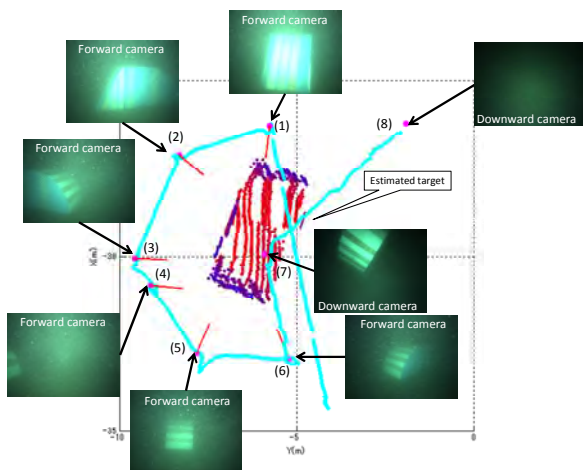


図3 相模湾実験におけるTri-TONの航跡および撮影画像。海底に設置したターゲットを全自動で多面的に撮影することに成功した。

(2)「サンプリング」グループ:B

海洋生物の調査において、生物本体を用いた DNA 解析や解剖、飼育は最も有効な解析手法であり、生物の採取が重要な任務となっている。海洋生物の採取は、吸引器やプランクトンネットを用いる方法が一般的であるが、本研究では生物の損傷を少ない手法として、対象物を包み込む形で把持が可能な水中グリッパを開発した(図 4 参照)。

水中グリッパの操作部は、伸縮可能なゴム素材で覆われた袋形状をしており、内部に流体及び微粒子の混合流体を封入した構造となっている。把持対象物に操作部を押し付けることで把持対象物形状に操作部が変形し把持対象物を包み込み、粒子混合液体の内圧を制御し操作部の形状を固定化し対象物を把持する機構となっている。操作部が柔軟素材であり対象物の形状に合わせて変形するため、生物への損傷が少ないと考えられる。また、高圧下において、水中グリッパの制御を行うため、ピストンを用いた油圧式アクチュエータを設計した。



図 4 開発した水中グリッパ

(3)「生物」グループ:C

自律型海中ロボットの生物サンプリングに向けた生物多様性の把握に関しては、AUV を用いて海洋底の底生生物やプランクトンを映像化し、生物の多様性や分布を解析する技術研究に資するため、本年度は、鯨骨生態系(クジラ遺骸周辺に生じる生態系で、その遷移過程は初期の腐肉食期から、骨侵食期、化学合成期、および終期の懸濁物食期に分けられる)における底生生物群集の観察および化学分析解析システムの構築を無人有索潜水調査船 ROV を用いて行った。また、プランクトン映像解析システムとして、自律型有索無人ロボット(U-ROV)を用いて、プランクトン解析システムを構築した。

自律型海中ロボットの生物サンプリングに向けた深海生物 3D モデリング化の検討に関しては、ロボット部隊グループとの連携研究を進め、沈設した鯨遺骸について(図 5 参照)、腐肉食期から骨侵食期にいたる鯨骨生物群集の変化と鯨遺骸の消費速度を 3 次元形態計測から解析するため、ロボット部隊グループが開発した 3D カラー画像計測システム(seaXerocks)により、無人潜水調査船(ROV)を用いた鯨遺骸の 3D マッピングによる鯨遺骸軟組織の容積変化の推定を行った(図 2 参照)。

捕獲生物の同定のための DNA バーコーディング手法の検討に関しては、1) 鯨遺骸周辺の化学環境調査、2) U-ROV によるプランクトン解析を行い、システムの AUV への展開の可能性を検討し

た。1)については、上記の鯨遺骸の直近で堆積物を採取し、化学分析を行った。その結果、鯨の軟組織に由来する有機物の分解に伴い、堆積物の無酸素化が進行し、総有機炭素や総窒素が特に堆積物表層で増加するなど環境の変化が認められた。しかし、この鯨骨生態系が未だ腐肉食期であるため、化学合成に十分な硫化水素の発生には至っておらず、同位体組成にも有意な変化は見いだされなかった。今回の結果は、堆積物の採取により、鯨骨生態系の堆積物中の化学環境変化に関する定量的なデータが得られることを示しているが、堆積物のAUVによる採取は大変難しいため、今後、AUVに搭載可能な採取装置の開発が期待される。2)については、自律性は高いが光ケーブルにより映像をリアルタイムで母船にて視認可能なU-ROV (PICASO)を用いてプランクトン解析システムを構築した。

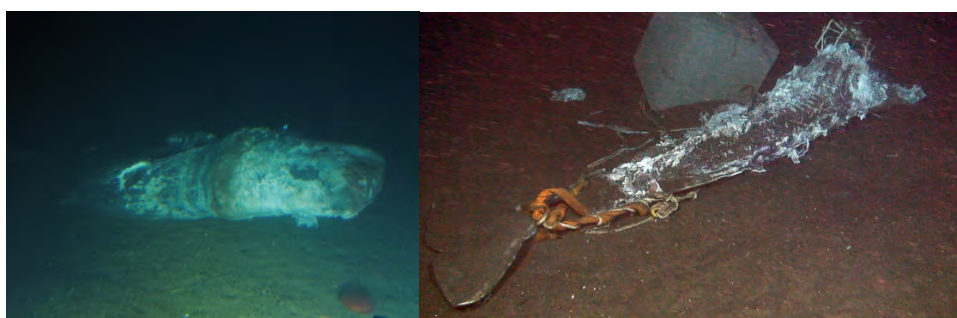


図5 2012年6月8日沈設置後(左)および約2週間後(右)のマッコウクジラ遺骸(相模湾, 水深490m)

(4)「熱水」グループ: D

熱水地帯の海中・海底環境の観測を行うための新しいシステムの要件を検討するため、以下の4項目を実施した。

1) 熱水域の地形・表層地質・地質構造に関する研究: AUV で得られた海底音響データを元に島弧熱水系の詳細な地形・地質構造の解析を行い、ソナー画像から自動的に表層地質を分類する手法や水中音響・磁気探査とあわせて総合的に熱水系を観測する手法を開発した。また、熱水活動域のビデオ画像と微地形の解析から、熱水活動の時間変遷と形成されるマウンドの規模や形態に密接な関連があること、マウンドの形成に熱水溶液中の粒子状物質の堆積が関係していることなどを明らかにした。

2) 熱水活動と周辺環境に関する研究: 鹿児島湾若尊熱水系において、海上からのCTD/DO観測の結果とROV搭載のCTD観測の結果について比較検討した。若尊熱水系では噴出する熱水中の塩分(塩化物イオン)濃度が海水の半分しかないため、これを指標としCTD センサの結果を見ると、同じ熱水チムニー直近で得られたデータでも、ROV搭載のセンサにより大きな塩分濃度の変化が記録されていることがわかった。また、センサのシグナルはROVが微速前進もしくは着底している際により大きくなる傾向が見られた。このことから、センサのレスポンスが熱水噴出といった点源の検出にとって重要なことが改めて確認された。

3) 化学・物理センサの試験運用: 硫化水素、pH電極、ORP等センサのデータを一元管理するマザーロガーの試験運用を行った。またAUV搭載用多連採水器ANEMONE64の稼動試験を

沖縄トラフ熱水域において実施した。

4) 海底写真画像と化学センサデータの統合的な可視化に関する検討: 海中ロボットに搭載される化学センサ群から得られたデータを統合して可視化する技術について、特に海中ロボットの位置データについてセンサデータ取得頻度と適合した補完を行う手法を確立した。また、時間的及び空間的な平均データの算出法について検討を行い、主に GMT を用いたデータ可視化手法を確立した。これによりそれぞれの化学センサのデータ取得頻度によらず均質なデータ可視化が迅速に行えるようになった。映像情報との可視化については GIS ソフトウェアを用いた統合可視化について検討を開始した。

§3. 成果発表等

(3-1) 原著論文発表

● 論文詳細情報

1. Toshihiro Maki・Takumi Matsuda・Takashi Sakamaki・Tamaki Ura・Junichi Kojima: "Navigation Method for Underwater Vehicles Based on Mutual Acoustical Positioning With a Single Seafloor Station", IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol.38, No.1, pp.167-177, 2013, A
2. T. Matsuda・T. Maki・T. Sakamaki・T. Ura: "Performance Analysis on a Navigation Method of Multiple AUVs for Wide Area Survey," Marine Technology Society Journal, Vol. 46, No. 2, pp. 45-55, 2012, A
3. Amir Ali Forough Nassiraei, Kazuo Ishii, Development of Ship Hull Cleaning Underwater Robot, 5th International Conference on Emerging Trends in Engineering & Technology, pp.293-298, 2012, B
4. Takayuki Matsuo, Takashi Sonoda, Kazuo Ishii, The Improving Method of Energy Efficiency for a Snake-Like Robot Using Neural Oscillators, Proc. of ICMA2012, 6 pages, 2012, B
5. Lindsay, D.J., Yoshida, H., Uemura, K., Yamamoto, H., Ishibashi, S., Nishikawa, J., Reimer, J.D., Fitzpatrick, R., Fujikura, K. and T. Maruyama: "The untethered remotely-operated vehicle PICASSO-1 and its deployment from chartered dive vessels for deep sea surveys off Okinawa, Japan, and Osprey Reef, Coral Sea, Australia", Marine Technology Society Journal 46(4), pp. 20-32, C
6. Noguchi, T., Tanikawa, W., Hirose, T., Lin, W., Kawagucci, S., Takashima, T., Honda, M.C., Takai, K., Kitazato, H., & Okamura, K. "Dynamic process of turbidity generation triggered by the 2011 Tohoku-Oki earthquake", Geochem. Geophys. Geosys. 13(11), 1-7, 2012, (doi:10.1029/2012GC004360), D
7. Nakamura, K., Watanabe, H., Miyazaki, J., Takai, K., Kawagucci, S., Noguchi, T., Nemoto, S., Watsuji, T., Matsuzaki, T., Shibuya, T., Okamura, K., Mochizuki, M., Orihashi, Y., Ura, T., Asada, A., Marie, D., Koonjul, M., Singh, M., Beedessee, G., Bhikajee, M., & Tamaki, K. "Discovery of new hydrothermal activity and chemosynthetic fauna on the Central Indian Ridge at 18°-20°S", PLoS ONE, 7(3), e32965, 2012, (doi:10.1371/journal.pone.0032965), D
8. Kawagucci, S., Yoshida, Y.T., Noguchi, T., Honda, M.C., Uchida, H., Ishibashi, H., Nakagawa, F., Tsunogai, U. Okamura, K., Takaki, Y., Nunoura, T., Miyazaki, J., Hirai, M., Lin, W., Kitazato, H., & Takai, K. "Disturbance of deep-sea environment induced by the M9.0 Tohoku Earthquake", Scientific Report 2:270, SREP-11-01108.3d, 2012, (DOI:10.1038/srep00270), D

9. Yoshikawa, S., Okino, K. and Asada, M., Geomorphological variations at hydrothermal sites in the southern Mariana Trough: relationship between hydrothermal activity and topographic characteristics, *Marine Geology* 303-306, 172-182, 2012 (doi:10.1016/j.mergo.2012.02.013), D
10. Nakamura, K., Toki, T, Mochizuki N., Asada, M., Ishibashi, J., Nogi, Y., Yoshikawa, S., Miyazaki, J., and Okino, K., Discovery of a new hydrothermal vent based on an underwater, high-resolution geophysical survey, *Deep-Sea Research I* 74, 1010, 2013 (doi:10.1016/j.dsr.2012.12.003), D