



Team KUROSHIO ロボットで深海探査に挑む 海底探査技術国際競技大会「Shell Ocean Discovery XPRIZE」への挑戦

Team KUROSHIO (チームクロシオ) 一同

国内産学官8機関の若手研究者・開発者を中心に構成された「Team KUROSHIO」は、海中ロボット等を用いて、超広域高速海底マッピングの実現を目標とする海底探査技術の国際競技大会「Shell Ocean Discovery XPRIZE」において準優勝という結果を収めた。

本稿では Team KUROSHIO の挑戦の軌跡を報告する。

キーワード：海底探査、海中ロボット (AUV)、洋上中継器 (ASV)

1. はじめに

Team KUROSHIO は、無人探査ロボットを使って超高速・超広域な海底探査を行う国際競技大会「Shell Ocean Discovery XPRIZE (以降、本競技と呼ぶ)」に日本から挑戦した共同チームである。本競技のミッションは、海域に人が立ち入らず、すなわち船舶を用いることなく、最大水深 4,000 m の海底を超高速かつ超広域に探査し、海底地形図・海底写真を獲得し、速やかに提出するというものである。2015 年 12 月に開催が発表された本競技には世界から 32 チームが参加し、2019 年 6 月にその最終結果が発表された。Team KUROSHIO は、世界第二位となる成績をおさめた。大会参加から書類審査、予選、決勝、そして結果発表まで、3 年半にわたる Team KUROSHIO の挑戦について報告する。

2. これまでの海底探査技術

遠く離れた火星や月の表面でさえ、宇宙探査機を用いて 100 m、あるいは数十 m の単位で地形を計測することが可能となった現代では、人類の住む地球については、その表面形状を正確に把握していると思われがちである。しかし、実は海底地形はおおよそ 1,000 m 単位でしかわかっていない。その理由は、他の天体と違い、地球の表面に豊富に存在する水、すなわち海水が、地球の表面を覆い隠しているからである。現在の技術で海底地図を作るためには、海洋調査船に多くの専門家が乗り込み、船底のソナーによる音波を用いた海底調査を実施することになる。しかしこの方法では、

ソナーと海底との距離が離れるにつれて得られる地形の精度が落ちるため、深海底では細かな地形を読み取ることができない。本来は、世界のどこでも、一定の解像度で詳細な地図を作りたいことと考えると、地球の海底面探査を行うためには、深海底に近い一定高度でソナーを運搬する必要がある。そのため、ソナーを搭載し、海底から一定高度を自律的に航走する自律型海中ロボット (Autonomous Underwater Vehicle, 以下、AUV) が近年注目されている。

現在行われている一般的な AUV による海底調査は、支援母船と AUV を 1 対 1 のセットで運用しており、その調査海域の広さは 1 日に 10 km² 程度とされる。AUV は一定の自律性を有するロボットであるが、内蔵エネルギーの制約から、AUV を調査海域まで船で運ぶ必要がある。日々変化する過酷な洋上環境で AUV を着水・揚収させるには、高度な技術を有したスイマーが必要になることもしばしばであり、未知の深海環境を調査する AUV は、依然として人間による遠隔管制をまだ必要としている。このように、AUV は多分に母船の支援下で運用されるため、AUV による調査を行うには、それとセットでの船舶・船員・オペレータ・スイマーの確保が必要となり、多くの人手と予算を必要とする。加えて、揺れる支援母船に長期間滞在することは、不慣れた人にとっては船酔いなどの高いストレス環境にさらされることにもなる。さらに、取得したデータは陸上へ持ち帰り、海底地形図作成のためデータ処理が必要となるが、これにも長い時間を要する。このような制約の中、詳細な海底地形図は、世界の面積比にして 10% 程度しか明らかになっていないとも言われる。

3. 無人探査ロボットによる世界初の海底探査技術競技大会

2015年12月、米国において、世界初の無人探査ロボットによる超高速・超広域の海底探査技術を競う競技会「Shell Ocean Discovery XPRIZE：シェル オーション ディスカバリー エックスペライズ」の開催が発表された。本競技は、米国の非営利組織であるXPRIZE財団が主催、石油業界大手のRoyal Dutch Shellがメインスポンサーとなり、総額700万ドルの賞金が用意された。

参加チームに課せられたミッションは、人が海に立ち入らず、すなわち、有人支援母船を使用せずに広大な海底調査を限られた時間で行う、ロボットのみによる海底調査である。具体的には、無人探査ロボットを使って24時間以内に最低250 km²、目標は東京ドーム1万個分に相当する500 km²の広さで、水平5 m、垂直50 cmの精度で海底地形図を作成すること、さらに海底の特徴的な画像を10枚以上撮影することである。24時間の調査終了後、さらに48時間以内にすべてのデータを取り出し、処理して提出する必要がある。さらに、全ての機材は40 ftコンテナ（長さ12,192 mm、幅2,438 mm、高さ2,591 mm）1つ分の容積に納まっている必要があり、たくさんのロボットを用意すればいいというものでもない。ビジネスで使える、実用的な調査システムが求められる。これは、発表当時の技術レベルを遥かに凌駕する非常に厳しい課題設定であった。このミッションを達成するには、24時間で既存AUVが調査可能な範囲を大きく上回る調査範囲を高速に調査するシステムが必要であり、しかもそれを母船無しで海域展開・運用するという、全く新しいシステムを構築する必要があった。

オイル・ガス資源開発では、数100 km²以上に及ぶ

広大な海底からオイル採掘ポイントを決定する事前調査を行うとされ、その開発エリアは徐々に大深度化しつつある。大深度におけるマッピングにはAUVが必要だが、それは船舶に追加的なコストが発生することを意味する。このようなルールが策定された背景として、以上のような状況が推測される。この市場ニーズを具体化したものが、本競技の課題として設定されていると考えられる。

本競技には、技術提案書審査（書類審査）、Round1技術評価試験（予選）、Round2実海域競技（決勝）という3つの関門があり、大会アナウンスからRound2実施まで僅か3年間という、新しいシステムを開発・実証する期間としては極めて短い設定がなされた。しかも、各競技実施場所は世界のどこで行われるか、大会アナウンス時には一切公表されないため、高度なロジスティクス能力やスケジューリング、マネジメント力が求められる。

開催公表後、2016年6月にはルールが公開され、2016年9月に参加チーム登録が締め切られた。この時点で、世界中から32チームがエントリーし、日本からはTeam KUROSHIOを含めて3チームがエントリーした（図-1）。

4. Team KUROSHIO の航跡

2015年12月に本競技の開催が公表されると、中谷武志（JAMSTEC）、大木健（JAMSTEC）、西田祐也（九州工業大学）、ソートン・ブレア（東京大学）という20代から30代の4名の研究者が参加を決意した。4人は基本的なロボットシステムのコンセプトを考案した。これは、洋上ロボット（Autonomous Surface Vehicle：ASV）により、複数のAUVを調査海域まで輸送、切り離し、陸上からASV経由でAUVをコ



図-1 Shell Ocean Discovery XPRIZE のスケジュール（最終）

ントロールすることで、上記のミッションを達成するものである。電池で駆動する AUV は航続距離・時間が限られるうえ、陸上管制局との直接通信を行うことは遠隔海域では困難である。そこで、ガソリンをエネルギー源とする航続能力の高い ASV に衛星通信装置と水中音響通信装置を搭載することにより、AUV 輸送と AUV 通信中継を担わせることが設計のコンセプトとなっている。この際、非常に広い範囲を短時間で調査するため複数の AUV を同時運用できることが必要となる (図-2)。

4名は、それぞれの所属機関の上司らを説得し、資金や機材を調達し、4人の活動やビジョンに賛同する仲間を増やしていった。この地道な活動が奏功し、無人探査ロボットの研究開発・オペレーション等を行ってきた研究機関・大学・民間企業、合計8機関での共同研究契約に基づく協働チーム「Team KUROSHIO」が結成された。チームの名称は、日本を代表し世界でも知られている暖流の黒潮にちなみ、熱く力強いトレンドを日本から起こしていきたいという想いが込められている (写真-1)。

参画機関は次の8機関。民間企業から、三井 E&S 造船(株)、日本海洋事業(株)、(株) KDDI 総合研究所及びヤマハ発動機(株)の4社が参加。大学からは、国立大学法人東京大学生産技術研究所と国立大学法人九州工業大学が参加。そして、国の研究所として、国立研究開発法人海洋研究開発機構 (JAMSTEC) と国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所が参画。総勢30名以上の若手を中心とした研究者・技術者が参加した。それぞれの機関が AUV や ASV、様々な技術や人材を供出し、短期間でのシステム実証を目指した (図-3)。

最初の関門は2016年12月の技術提案書による書類審査であった。これはチームの調査戦略や使用する機

体のデータ、予算計画、チーム構成などをまとめて提出し、実際にそのチームが実海域での調査を行えるか、主催者が審査を行うもの。Team KUROSHIO は各機関が所有する機体や資材の利用許可を取り付けて、競技実施に必要な体制を構築していった。これらチームの戦略を技術提案書としてまとめ、12月15日に



写真-1 2018年3月の Team KUROSHIO 記者会見



図-3 国内8機関による研究開発コミュニティの構築



図-2 Team KUROSHIO のシステム設計コンセプト

XPRIZE 財団へ提出した。翌 2017 年 2 月, Round1 へ進出する 21 チームが公表された。Team KUROSHIO は無事, Round1 へ進出を決めた。なお, この時点で日本からは Team KUROSHIO のみが進出することとなった。

その後, Team KUROSHIO は, Round1 に向けて, 異なる組織の AUV 同士を統合運用するための検証試験を駿河湾にて実施する等, 技術開発と実海域試験を繰り返して技術を磨いていった。Round1 の競技開催地がプエルトリコと決まると, ロジスティクスを含めた準備が急ピッチで進むこととなった。しかし, 2017 年 9 月, 2 つのハリケーンがプエルトリコを直撃し, 現地は甚大な被害を受けることとなった。本競技主催者である XPRIZE 財団は, Round1 の実施内容を, 実海域での競技から, 審判団が各チームを訪問・審査する形に変更することを決めた。具体的には, 海底探査システムの機体の航続性能や潜航能力, マッピング解像度など, 11 項目の技術について審判団が評価することとなった。限られた時間の中, プエルトリコと同じ試験を実演することはできないため, Team KUROSHIO はどのようにその技術をプレゼンテーションするか主催者との調整を進めた。

その結果, Team KUROSHIO の Round1 は, 2018 年 1 月, 東京大学生産技術研究所にある海中ロボット用の試験水槽で行われた。水中での撮影や長時間航行, 地形データ処理のデモンストレーションを実施した(写真-2)。

2018 年 3 月, イギリス・ロンドンの国際展示会 Oceanology International 2018 内のイベントにおいて, Round1 の結果発表が行われた。決勝となる



写真-2 水槽における Round1 デモンストレーション実施の様子

Round2 に進むことができたのは僅か 9 チームであった。米国から 4 チーム, 欧州から 4 チーム, アジアからは Team KUROSHIO1 チームのみであった。その後さらに米国の 1 チームがリタイアし, Round2 には 8 チームが挑戦することとなった(図-4)。

5. Team KUROSHIO の戦略

Team KUROSHIO の戦略は, 次のとおりである。陸上にはインターネットに接続した陸上管制局を設置し, 運用担当者を配置する。続いて, 洋上ロボットである「洋上中継器 (ASV)」が, 複数の AUV を岸壁から調査海域まで曳航する。その後, 陸上管制局から通信衛星を経由して遠隔操作される ASV から AUV を切り離す。切り離された AUV は, 搭載されたバラストの重量とスラストの推進力で海底からの高度約 100 m の水深まで潜航し, あらかじめプログラムされたルートを航行する。同時に, ASV は水中音響通信に

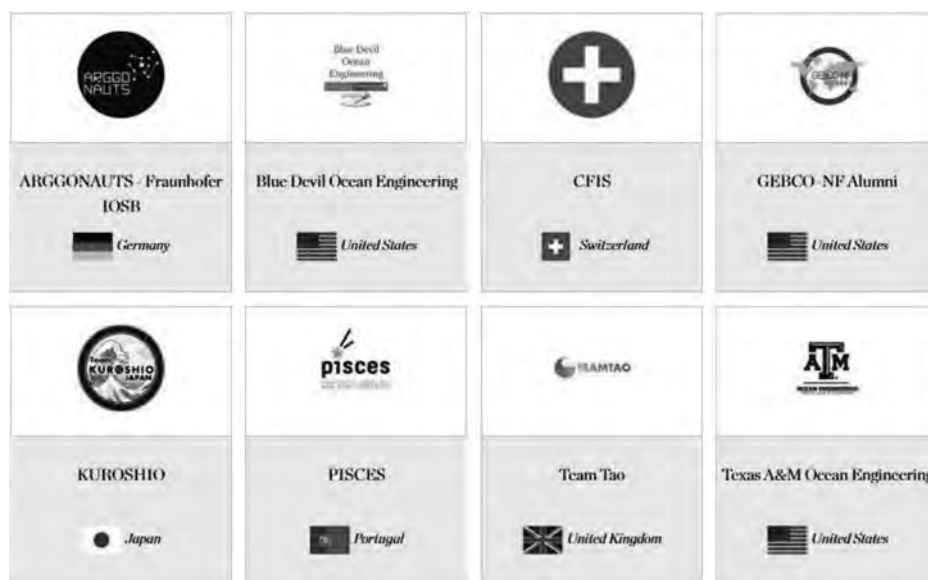
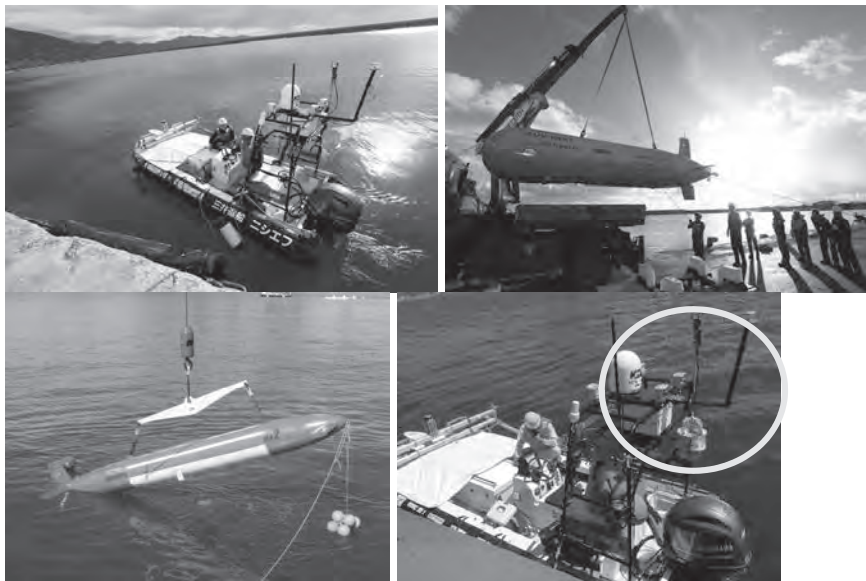


図-4 Round2 に進出した 8 チーム (XPRIZE 財団 HP より)



写真一3 (左上) ASV, (右上) AUV-NEXT, (左下) AE-Z, (右下) ASVに搭載された衛星通信機器

より航行している AUV を監視するとともに、陸上管制局に衛星通信で ASV と AUV の航行状況を伝える。調査終了後、AUV は浮上し、ASV と共に岸壁まで帰還。海底地形・画像データは AUV 内の SSD に記録される。データ量が多いため、海底地形・画像データは、AUV 揚収後に AUV 耐圧容器内の SSD を取り出し、解析チームによる並列処理を行い、調査終了後 48 時間以内のデータ提出を目指す (写真一3)。

Round2 に向けた技術開発のポイントとしては、①水深 4,000 m で 24 時間以上航行できる AUV を複数用意すること、②複数 AUV を ASV1 機で無人曳航・展開・監視すること、③複数の AUV が取得した海底地形データを 48 時間以内にマッピングデータ化すること、の 3 点が挙げられ、Round1 技術評価試験を実施する前から技術開発を進めていた。

6. Round2 実海域競技

2018 年 9 月、決勝となる「Round2 実海域競技」は 2018 年 11 月から 12 月にかけて、ギリシャ共和国ペロポネソス半島南方に位置する港町カラマタの沖合で開催されることが発表された。世界のライバルは米国 3 チーム、欧州 4 チーム。同じ海域を全チームが調査するため、各チームが順番に現地に入る方式で実施されることとなり、最も遠くから参加する Team KUROSHIO に割り当てられた Round2 実施期間は、全チームで最後の 2018 年 12 月 9 日から 19 日の 11 日間と決まった。この 11 日間で、現地での陸上管制局の設置や動作確認、実際の競技実施、片付けなどをすべて終える必要がある。カラマタ港に設置された陸上基地局設置ス

ペースにそれぞれのチームが入ったとき、各チームはようやく、実際の詳細な競技海域を主催者から知らされる。主催者は公正を期すため、実際の競技海域を各チームの競技開始まで秘匿し、競技を実施した。

Team KUROSHIO の機材の多くは、日本から船便で 1 ヶ月以上かけてギリシャに輸送する。その間、ロボットが壊れていないか、いざ修理が必要であれば整備スペースが必要となる。Round2 に先立つ 3 ヶ月前、Team KUROSHIO はギリシャに人員を派遣し、チームの一員であるヤマハ発動機の現地販売代理店に協力を要請。これにより、12 月 5 日から 8 日まで、ギリシャのアテネ郊外に整備スペースを借り受け、数日間の機材整備を行ったうえで、12 月 9 日に決勝会場となるカラマタに移動し、Team KUROSHIO の Round2 がスタートすることとなった。

数日先の天候や海象などを考慮しつつ、実施スケジュールの検討が進められ、12 月 13-14 日に Team KUROSHIO の実海域競技本番を実施することとした。しかし、実施した初回のトライでは、調査海域の直前にて ASV から AUV の切り離しがうまく動作しないというトラブルが発生した。回収後に原因を調査したところ、切離し信号を送る電線が破断していた。海での大きなうねりがきっかけで破断したものと推測された。主催者との協議によりリトライが認められ、修理のうえで再度競技に臨むこととなった。

12 月 16-17 日に実施したリトライでは、大きなトラブルなく制限時間を最大限に活かすことができ、カラマタ沖の海底地形データを獲得することができた。その後の解析により、定められた解像度を満たすマッピングデータを作成することに成功した。そして、2018



写真-4 (左上) 12/16の出港時, (右上) 12/17のAUV帰港, (左下) ASV帰港, (右下) マッピングデータ提出の写真

年12月19日、日本時間22時50分にXPRIZE財団へのデータ提出を完了し、Round2の全日程を終了した。Team KUROSHIOは、カラマタ沖において約5km × 33.5kmの範囲の海域で調査を行ったが、そのうち正解となる海底地形図が得られた範囲がいかほどかは、主催者とは別に本競技のために参集された審判団によって評価されることとなる。

Round2において、当初、想定していた、ASVの離岸・調査・着岸までの無人運用、無人でのAUV展開・運用、ASV及びAUVの24時間以上の長時間連続航行などを達成することができた。一方、無人でのAUV回収等については、課題が残る結果となった(写真-4)。

7. 結果発表

2019年5月末、モナコ共和国のモナコ海洋博物館において「Shell Ocean Discovery XPRIZE」の結果発表セレモニーが開催された。Team KUROSHIOはGrand Prize Runner-up、すなわち世界第二位という



写真-5 モナコでの授賞式に臨んだ Team KUROSHIO メンバーと主催者

結果となり、賞金として100万USドルが贈られた。主催者からは、仕様が異なる複数のロボットを連携運用する技術の独自性や、条件や状況の変化に対応する柔軟な運用力、カバー領域の広さなどが評価された(写真-5)。

8. おわりに

今回の「Shell Ocean Discovery XPRIZE」への挑戦では、Team KUROSHIOが得意とする最大限のパフォーマンスを発揮できた。当チームへご支援いただいた全ての方々に対して改めて感謝申し上げます。

Team KUROSHIOは、この挑戦を通じて培った技術により、将来、今や誰もが利用しているインターネット通販のように、誰でも簡単に海中・海底のデータを得られるシステムの構築を目指している。このシステムの実現を「One Click Ocean (ワンクリックオーシャン)」構想として掲げ、海上海中ロボットを用いて調査を無人化し、安価にそして気軽に海底調査を行うことができる将来を描いている。

例えば、定期的に海底の詳細地形図を作成することができれば、地震のトリガーとなり得るプレートの動きがわかるかもしれない。実は発見されていない活発な海底火山が見つかる可能性もある。新種の生き物と遭遇するかもしれない。思いも寄らないビジネスが生まれることも考えられる。

Team KUROSHIOは、今回の挑戦を通じて培った技術とオペレーションをさらに発展させて、日本発の調査技術として世界へ展開できるよう、技術開発を進めていく。