深海自律形無人探査機とその要素技術の最前線

— 通信衛星による海洋ネットワークの話題等 —

Cutting Edge Underwater Robot Technologies

— Topics Including an Ocean Communication Network by the Geostationary Satellites —

吉田 弘 Hiroshi Yoshida[†]百留忠洋 Tadahiro Hyakudome[†]石橋正二郎 Shojiro Ishibashi[†]澤 隆雄 Takao Sawa[†]志村拓也 Takuya Shimura[†]

Summary

日本の深海技術とその応用が注目を集めている。これまでの技術開発は主として科学研究目的であったが、近年、日本の排他的経済水域内に有効な海底資源があることが分かってきており、広大な日本の領域で効率良く資源探査をするための技術開発が必要とされている。独立行政法人海洋研究開発機構(JAMSTEC)は長年にわたり深海技術を蓄積しており、世界でもトップクラスの自律形無人探査機等を開発してきている。本論文では、これまでに開発してきた無人探査機とその要素技術について解説し、その資源探査への応用例と今後の展望について述べる。

Key words

自律形無人探査機, 資源探査, 通信衛星, 燃料電池, 合成開口ソナー

1 ま え が き

地球の表面積の7割を占める海洋は、地球環境に大きな影響を与えることが分かっており、また資源の宝庫でもある。世界第6位の排他的経済水域の面積を誇る我が国は、安全・安心で快適な暮らしを維持し、また経済の発展を持続させるために、海洋の三次元的な調査・利用を積極的に行う必要がある。

独立行政法人海洋研究開発機構(JAMSTEC)が行っている海洋の調査には大きく分けて、気候変動研究のための海洋の物理化学量(温度、塩分、pH、二酸化炭素等)の調査、地殻変動等の研究のための構造探査(音波、重力、磁気等)、生物多様性や微生物研究のための採取、撮影、化学成分調査等がある。これらの調査を実現するためのプラットフォームには、研究調査船、漂流ブイ・繫留^{けいりゅう}ブイ、調査船からワイヤ等でえい航するえい航体などがあり、所望のセンサを搭載して使用する。以上の手法では深海での観測場所が正確に指定できない。

一方、近年の電子技術やメカトロニクスの急速な発展により、深海を直接探査できるプラットフォームとして有人潜水船や、調査船とケーブルで結ばれた遠隔制御形無人探査機(ROV: Remotely Operated Vehicle)が開発され、海中

の特定の場所を詳細に観測し、また作業するためのツールとして使用されている。しかし、潜水船やROVの航行範囲が狭いために観測範囲が限定されて、運用コストもかかるため広域を効率良く探査できないデメリットがある。

1900年代末期からは、広大な海をより効率良く調査する目的で、母船の随伴なく深海調査が行える自律形無人探査機(AUV: Autonomous Underwater Vehicle)の開発が進んだ。AUVはコンピュータを搭載したロボットであり、海中の調査仕様を潜航前に入力し、その仕様に従って無人で海中の調査を実行する。現在、国内においては幾つかのAUVが開発・運用されており、環境調査や海底調査に利用され成果を上げている^{(1)~(3)}。このうち、公募により利用できるAUVは国内ではJAMSTECが運航している「うらしま」⁽⁴⁾だけである。「うらしま」は1998年に開発が開始された大形のAUVで、世界で最も長距離を航行できる。2005年には燃料電池を搭載した世界初のAUVとして、連続航行距離317kmの世界記録を樹立した。それ以降現在までは専らソナーによる海底地形のイメージングの成果を上げている。また、資源探査のための新しいセンサの評価やそれを利用したデータが得られている。

2007年には第3期科学技術基本計画に盛り込まれた国家基幹技術として、宇宙から深海底まで、我が国の総合的安全保障に不可欠な観測・探査活動(地球観測・災害監視、資源探査)の基盤となるシステムを確立するために「海洋地球観測探査システム」が選ばれた。深海に関わる具体

[†] 独立行政法人海洋研究開発機構海洋工学センター、横須賀市 Marine Technology Center, Japan Agency for Marine-earth Science and Technology (JAMSTEC), Yokosuka-shi, 237-0061 Japan

的な技術開発項目の一テーマである「次世代型深海探査技術の開発」では、「うらしま」の後継機となる 3,000 km を連続航走可能な長距離巡航形 AUV (LCAUV: Long-range Cruising AUV)⁽⁵⁾ を開発するための要素技術開発が開始された。3,000 km という距離は、JAMSTEC のある横須賀本部から沖の鳥島程度までの往復が可能な距離であり、航行する時間はおおむね 600 時間(25 日間)である。

「うらしま」開発時の技術では 3,000 km を連続航行するための動力源を搭載するため機体サイズが 50 m 級と大形化してしまうと予測された。また、電波が利用できない海中では、AUV 自身の位置を知るために慣性航法装置が使用される。しかし、慣性航法装置は位置演算に加速度の積分値を用いるため、航行距離(時間)が長くなると誤差も比例して蓄積されてしまい、位置精度が低下する。位置を絶対的に計測する手法としては音響測位装置(位置計測誤差はカバーエリアの数%)があるが、カバーエリアが数十 km であり、3,000 km をカバーするためには設置する音響灯台の数が多く、非効率となることが問題であった。長時間にわたる自律航行では、深海を航行中の LCAUV がどのような状態であるかモニタするために、低通信速度で良いが数百～1,000 km の音響通信も必要となる。更に、プラットフォームだけでなく、長距離を航行しながらも精密なデータを取るためのセンサの開発(特にソナー)も必要となる。以上のことから要素技術としては、(1) 高効率燃料電池の開発、(2) 高精度慣性航法システムの開発、(3) 水中音響技術、(4) 精密観測・探査機器の開発が注力すべき項目とされた。

AUV を含む無人探査機の需要は石油産業のない日本ではそれほど大きくなく、専ら科学調査や救難作業に利用されていた。しかし、ここ数年では海底鉱物資源に注目が集まり、調査のための深海探査機開発が進められている。2010 年 7 月には、新成長戦略～「元気な日本」復活のシナリオ～が閣議決定され、「海洋資源・海洋再生エネルギー等の開発・普及の推進」の取組みを重点事項と位置付けられたことから、より積極的に資源探査のための AUV 等無人探査機とセンサ技術開発のための予算が計画されている。

本稿では、上記のように近年最も注目を集めている AUV 若しくは海中ロボットについて、JAMSTEC における AUV 開発、要素技術を含むシステム紹介、特に通信衛星を利用した海洋と陸上のネットワーク実験について詳細を説明し、最後に AUV の今後の応用について紹介する。

2 AUV「うらしま」の開発

JAMSTEC では 1980 年頃から無人探査機の開発を進めてきた。1998 年には気候変動研究の目的で、北極海水下を航走し調査を行う長距離巡航探査機 LCAUV「うらしま」(図 1)の開発に着手した。「うらしま」は最大潜航深度 3,500 m で、動力源にリチウムイオン電池(航続距離 100 km)と燃料電池(航続距離 300 km)の 2 種類を選択することができる世界で初めての長距離 AUV である。なお、ここでいう深度とは、海面から探査機の位置までを計測した垂直距離である(一方、探査機から海底までの垂直距離を高度といい、深度と高度を加算すると水深となる)。「うらしま」は長さ 10 m、重さ 10 t(燃料電池搭載時)である。図 2 は燃料電池搭載時の「うらしま」の構成を示す。魚雷のような形をしており、外殻全体が流体抵抗を低減するために FRP (Fiber Reinforced Plastics) 製のフェアリングカバーで覆われている。フェアリングカバーはチタン製のフレームに取り付けられており、カバーの内側も海水で満たされる構造である。チタンフレームには図 2 のように多くの耐水圧容器 (Pressure Vessel) に収納したコンピュータやセンサ、アクチュエータが搭載される。耐水圧容器間は水中ケーブルで接続されている。また、図中で空間となっている部分は、浮力を得るための浮力材(マイクロガラスバルーンをエポキシ樹脂で固めたもの)で埋め尽くされている。

表 1 に「うらしま」の主要目を示す。動力源に燃料電池が選ばれたのは、当時のリチウムイオン技術では同形の機体で 300 km を超える連続航走が望めなかったことと、次期の開発を考慮したためである。例えば 10 倍の距離を航走するためには、リチウムイオン電池では 10 倍の量の電池を搭載する必要がある。一方、燃料電池は化

図 1 LCAUV「うらしま」

図2 「うらしま」の構成図（燃料電池搭載時）

学電池ではなく発電機であることから、発電部の大きさはそのまま、燃料のみ10倍の量が必要となる。燃料の高密度化ははまだ開発途上であり、将来は、より高密度に燃料を保持できることに期待したわけである。

よく知られているとおり、海中では電波が利用できないため、AUVの位置をGPS（Global Positioning System）で計測することはできない。しかし「うらしま」が自律して航走し、精密な海底地形を計測するためには、正確な自己位置を知る必要がある。そのため、慣性航法装置を中心とした、音響測位とドップラー速度計によるハイブリッド位置計測装置が搭載された。位置計測の時間当りの誤差は0.6海里（1海里＝1,852m）であった。慣性航法装置は、角速度を計測する3軸ジャイロと、直線可速度を計測する3軸加速度計で構成される。位置計測では、加速度を2回積分するため、誤差が経過時間とともに蓄積されてしまう。位置精度を向上させるためには蓄

積される誤差を軽減する必要がある、ジャイロと加速度計の誤差を低減することが必要である。ジャイロで利用しているレーザの質を向上させる等の改善を施し、当時としては他に類を見ない、純慣性にて毎時0.2海里という位置計測誤差を達成できた。

AUV制御の要である制御装置ハードウェアには、CPU（Central Processing Unit）にモトローラの68系を搭載したデュアルCPUボードと、数十個の周辺機器との通信・制御を行う複数のインタフェースボードを搭載している。OS（Operating System）にはVX-WORKSを用い、各機器を制御するためのミドルウェアとAUV自身の運動制御をするためのアプリケーションソフトウェアを開発した。運動制御にはPID（Proportional, Integral, Derivative）コントローラを用い、基本的には水平・垂直ラダー（舵）と主推進スラスト（主推進機）を制御する。観測のための制御は、あらかじめ計画した航路と観測作業をプログラムしたミッションシナリオに基づき実行する。ただし、遠隔制御でマニュアルによる指令がきた場合にはそちらを優先するようになっている。

「うらしま」に搭載されている観測装置は表1のとおりである。特に海底調査のためには、サイドスキャンソナーとマルチナロービーム音響測深機が有効であり、観測成果を上げている。サイドスキャンソナーは横方向に扇状に音響ビームを振り、受信した反射信号の強弱と時間によりライン状の像を得るソナーである。これは、一定速度でAUVが航行することで三次元的なイメージを得ることができる。数百mの高度でも観測を可能にする一方で、80m程度の高度でも精細な音響画像を得られるように、「うらしま」には120kHz/410kHzの2周波数が選択できるサイドスキャンソナーが搭載されている。

表1 「うらしま」主要目

項目	仕様	備考
大きさ	10.6 m × 1.3 m × 1.5 m	突起部除く
空中重量	10 t	
潜航深度	最大 3,500 m	
航続距離	300 km 以上	
巡航速度	3 knot	最大 4knot
推進器	主推進スラスト 1 基, 水平スラスト 1 基, 垂直スラスト 2 基, 水平垂直ラダー	
動力源	リチウムイオン電池 / 燃料電池	
航海計器	慣性航法装置, ドップラー速度計, ホーミングソナー	
通信装置	音響通信装置, 光通信装置, 電波通信装置（浮上時のみ）	
観測装置	サイドスキャンソナー, マルチビーム測深機, サブボトムプロファイラ, カメラ, CTDO（電導度, 温度, 深度, 溶存酸素）	

図3は2006年に熊野トラフ泥火山微細地形構造調査を行った際に取得したサイドスキャンソナー画像のモザイク図である。後にこの泥火山周辺には、高濃度のリチウムがあることが掘削調査でわかっている。

一方、マルチナロービーム音響測深機は海底の地形を詳細に観測するソナーであり、AUV直下の海底を二次元の細いビームで観測できる。「うらしま」には400 kHzの測深機が搭載されており、最大200 mの高度から128度の範囲で512本のフォーカスドビームを生成することで、高精度・高分解能の海底地形データが得られる。2007年には沖縄トラフ伊平屋北部での深海底調査により、熱水噴出域の詳細な形状と分布のイメージングに成功している。図4に得られた画像を示す。この調査結果によりこの海域に活発な活動をしている熱水鉱床があることが分かり、その後のJAMSTECが所有する地球深部探査船「ちきゅう」による掘削調査によって、付近の海域にはレアメタルが含まれる黒鉱鉱床が形成・保存されていることが判明している⁽⁸⁾。

図3 熊野トラフ第5海丘の音響微細画像⁽⁶⁾。サイドスキャンソナーのイメージに等深線を重ねている。明部は強い、暗部は弱い音響反射を示す。

図4 伊平屋北部で得られた熱水噴出海域の海底地形図⁽⁷⁾

3 国家基幹技術による次期 LCAUV の要素技術開発

開発する LCAUV は、図5(a)に示すような北極海水下の環境観測、図5(b)に示すような広域資源探査等を行うための探査機と考えてシステム設計を行い、開発を推進した。表2には「うらしま」と次期 LCAUV との性能比較を示す。次期 LCAUV では600時間程度の自律航行を行うことから、信頼性の向上と、遠隔監視のための長距離通信の開発も必要であると考えた。また、資源探査の目的で効率良く地形探査を実施するためには、なるべく測線間隔を広く取る(図5(b)では500 m 間隔)必要がある。

(a) 北極(海水下の観測に必要な航続距離) (出典(9))

(b) 3,000 km 連続航行による超広域海底探査のイメージ図。1回の探査で50 km × 30 km のエリアが探索できる。これは相模湾全体を観測できる広さである。

図5 広域観測・探査の例

表 2 LCAUV の性能比較

機 種	開発時期	動作時間	航続距離	出力	大きさ
「うらしま」	1998 ～ 2005 (現在運用中)	60 時間	317 km	4 kW	10 m
次期 LCAUV	2007 ～ 現在	600 時間	3,000 km	5 ～ 10 kW	10m 以上

しかし、その場合、探査機の高度が高くなり画像の解像度が低下してしまう。高高度からの観測でも高い画像分解能力を得るために、合成開口ソナーの開発にも着手した。

3.1 動力源

動力源技術開発として、閉鎖式固体高分子形燃料電池の開発と、高容量リチウムイオン電池の開発に取り組んだ。動力源は自動車のトレンドと同様にハイブリッド動力源とすべきと考え、深海用高性能電池が既存しないため、リチウムイオン電池も同時開発した。正極にニッケル系金属を用いて容量を向上させ、 $220 \text{ W} \cdot \text{h/kg}$ の重量エネルギー密度を達成した、ラミネート構造の平板リチウムイオン電池である⁽¹⁰⁾。このセルを防水加工して油中に配置する油漬け均圧方式を用いている。この方式はセルが直接圧力を受けるが、深度 1,000 ～ 2,000 m 以深で使用する探査機では、電池を耐圧容器に収納するよりも小形軽量に電池設計が可能となる。

燃料電池開発では、「うらしま」用燃料電池で発生した不具合であるガス循環用ポンプ問題、補機の大電力消費、水素のリーク、長大な起動停止時間を克服しながら、高効率化、小形化、高信頼性化を目指した。最初の三つの問題を解決するために新しい材料と新しい構成の燃料電池セルと、新コンセプトのシステム⁽¹¹⁾を開発した。このシステムにより問題点の克服と国家基幹技術の数値目標である効率 60% を達成できた。

新システムの構成と動作原理を図 6 に示す。システムは基本的には二つの燃料電池スタック（発電セルを複数積層して出力電圧を昇圧したもの）A と B、四つのバルブ V-#1 ～ V-#4、気液分離装置で構成される。図は簡単のために一方のガス経路のみ記述した。初期状態ではガスはタンクからスタック A に流入する。スタック A で半分のガスが消費され、A の余剰ガスが下流のスタック B に入り、B ですべてのガスが消費される。このときスタック A 内の生成水は余剰ガスで排出されるが、スタック B では余剰ガスがないために生成水はそのまま蓄積し、スタック B の発電性能はしだいに劣化する。そこである時間が経過したところで、バルブを切り換えてス

図 6 HETL 燃料電池の動作原理説明図

タック B を上流にすると、スタック B に蓄積された水が余剰ガスによって排出されることとなる。この動作を繰り返すことで、供給ガスは 100% 消費される上、ガス循環ポンプが不要となる。

開発したシステムでは更に新開発セルによりガス漏れと加湿器をなくすことに成功した。こうして問題の解決と同時に、部品点数の削減により高効率、小形、高信頼性化を実現した。また、起動停止時間の短縮は、システム系内のガス置換の方法を変更し、これをソフトウェア化することで数時間のオーダから数分のオーダに改善できた。このシステムを HETL (High-Efficiency Three-Less) 燃料電池と呼ぶ。開発した HETL 燃料電池プロトタイプで発電した場合の電流対電圧特性を図 7 に、切換動作の時間トレンドを図 8 に示す。図 7 において、探査機の消費電流を 8 A と仮定（設計目標値）したときの単セルの出力電圧はプロトタイプでは約 0.89 V となっており、HHV (Higher Heating Value) で評価した場合の効率は 60% を超えており要求仕様を満たしている。また、図 8 において、上部は各セルの電圧を示し、下部はバルブの切換信号を示しているが、切換のタイミングでの出力電圧変動は数%であり、実用上問題ない結果となっていることが分かる。2011 年 3 月末までに、プロトタイプによる陸上での連続 600 時間発電と、海中発電試験に成功しており、次年度以降、本燃料電池は実海洋プラットホー

図7 新旧の燃料電池セル電流対電圧特性

図8 製作したプロトタイプの実出力電圧の時間推移
(単セル電圧×6セル)

ム上に搭載実験を行い、実用化を進める計画である。

3.2 高精度慣性航法システムの開発

最もよく利用されている AUV の位置計測手法は、ドップラー速度検出器による計測速度を積分演算して得られた相対位置である。しかし、この方法では海底面が計測できる高度に探査機がいる場合のみ有効である。また、母船から AUV の絶対位置を測位するためには音響測位装置が用いられるが、計測精度は母船と AUV 間の距離の数%と大きい。我々は慣性航法装置に「うらしま」以前から着目しており、慣性航法装置の純慣性動作時の位置計測誤差を理論値近くまで低減することを目指した。そのために、リングレーザジャイロのレーザ伝搬経路の品質向上などを行ってきた。石橋ら⁽¹²⁾は計測誤差を低減する手法として、慣性航法装置を回転台の上に載せ、回転台を一定周期で回すことで蓄積する誤差を低減することを考え、約 1 桁の誤差低減を実現した。また、慣性航法装置に発生するバイアス誤差をあらかじめ予測し補正する機能も開発した。これらの技術開発により、時間当たりの誤差は 0.05 海里以下に低減することができた。一方で慣性航法装置の精度を維持したままの小形化にも取り組み、次年度には世界シェアトップの外国製品より、

サイズ、性能、価格の面で優位な小形高性能慣性航法装置の製品化が実現できる予定である。

3.3 水中音響技術

深海を航行中の LCAUV を 100 km 以上離れた遠隔地から直接監視するために、超長距離音響通信技術の開発を行っている。通常の音響通信は母船と AUV の間であり、母船は AUV の上海面にあることから通信方向は縦方向となる。一方、超長距離通信では陸上間の電波通信のように横方向伝搬が主となる。これに目を付けた志村ら⁽¹³⁾は、位相共役波を長距離海中通信に適用することを提案した(図9)。シミュレーションと海域試験によりアレー構造の最適化を行い、信号処理に適応等価を組み合わせることで、非常に良好な通信ができることを見いだした。これにより、これまでの海域試験で目標よりはるかに超長距離である 800 km 程度の音響通信に成功した。

図9 位相共役波による通信の原理

3.4 合成開口ソナー

合成開口ソナー (SAS : Synthetic Aperture Sonar) は理論的には 40 年ほど前に考案されていたが、海中で安定した航行を可能とするプラットフォームがなかったため発展しなかった。合成開口ソナーは、図 10 に示すように、直線的に移動しながら目標に繰り返し音波を照射し、反射波の情報をコンピュータ上で相関処理する。これにより大口径ソナーと同等の性能を実現し、小口径ソナーであっても遠距離から高分解能の海底地形等が得られる。SAS の問題点は、プラットフォームが動揺して直線的に航行できない場合である。複数回の送受波データを相互に処理して画像を生成するため、それぞれの送受波時における位置関係のずれがデータ処理に大きく影響し性能を低下する。しかし、安定した海中航走が可能な AUV の

図10 合成開口技術の原理

図11 海底の人工物の音響画像イメージ⁽¹⁴⁾

出現で近年飛躍的に発展し実用化されている。

更に JAMSTEC では、動揺の影響を軽減するために、波の周期性を考慮した大振幅の揺れにも対応可能な動揺補正技術を独自に開発した。加えて新たなアルゴリズムを開発し、従来の処理より数十倍以上の高速処理を実現した。

これら技術を活用することで、音響ビームの方向を変えるビームステアリング合成開口ソナーを開発した。2009年6月には「うらしま」にこのソナーを搭載して海底の調査を行い、従来ソナーに比べ3倍の分解能が得られた(図11)。

4 衛星通信技術の開発

JAMSTEC では技術試験衛星きく8号(ETS-VIII)と超高速インターネット衛星(WINDS)を利用して、海洋(深海)から陸上までのシームレスな通信を可能とするための機器の技術開発と試験を行い、これらで得られた知見

と技術を用いて近い将来的に洋上・深海プラットフォームや機器の遠隔操作・観測等を可能としたいと考えている。前述の LCAUV の遠隔監視には衛星が必須である。また、熱水鉱床やマンガンクラストの探査・観測のために複数の移動体深海プラットフォーム(例えば自律形無人探査機)を効率良く安全に運用するためには、洋上からリアルタイム監視のできる通信衛星と船舶やブイによる洋上中継装置が必要不可欠と考えている。これらの技術開発による海洋から陸上までのシームレスな通信環境の構築は急務である。

JAMSTEC は2008年度までに ETS-VIIIを利用して、洋上機器として ROV と AUV の二つの無人探査機を用いて、これらの遠隔操作を可能とするためのシステム開発と実証実験を実施した⁽¹⁵⁾。ただし、これらの試験においては、ETS-VIIIの不具合を解決するために地上の中継器(ギャップフィラー)を利用したため、陸域から半径2 km 以内の海上での試験に限定された。

2009～2010年度の試験では、より実用性を高めるために、ETS-VIIIと WINDS の二つの衛星を利用し、海中機器の状態や観測したデータを、より高速かつ長時間にわたり陸上に伝送し、研究者や一般の方々にその有効性を確認してもらうことを主目的として実験を実施した。また、ETS-VIII実験においては中継局(ギャップフィラー)を使用せず、地球局の送信側にアンプを用いた。このため海域の限定条件はなくなった。

4.1 ROV の遠隔制御

ROV 遠隔制御システムは基地局、静止衛星、洋上局、中継局で構成され(図12)、洋上局に接続されている深海探査機等を基地局から遠隔制御することが可能である。本実験は2008年11月に実施した。JAMSTEC 横須賀本部に基地局を設置し、東京大学三崎臨海実験所敷地内に中継局を設置、東大の「臨海丸」に洋上局と細径光ファイバ遠隔操作式の小形 ROV「MROV」を搭載した。アンテナ系は JAMSTEC で製作した防水形アンテナと追尾装置を用いた⁽¹⁶⁾。油壺湾の港に停泊させた「臨海丸」上の洋上局と横須賀本部の基地局間を、ETS-VIIIの回線を64 kbit/s でリンクした後出港して、正常に回線が保たれていることを確認した。図12に示すように「臨海丸」は、中継局と無線回線が確立できる見通し距離内の油壺湾にある状態で、アップリンクは中継局を経由して ETS-VIII に接続された。一方、ダウンリンクは直接中継局で受信した。「臨海丸」から「MROV」を船上にある専用の操縦

図 12 ROV の遠隔制御のシステム構成図

装置にて海中に潜航させた後、衛星遠隔制御に切り換え、JAMSTEC 横須賀本部にて圧縮された水中映像を見ながら「MROV」のパンチルトカメラやライトなどの機能を遠隔制御して水中生物の観測を行うことができた⁽¹⁷⁾。

4.2 AUV の遠隔制御

AUV 遠隔制御の実験構成は ROV と同等であるが、洋上局が AUV に搭載されているところが異なっている。衛星通信システムには、対水圧構造が必要であり、搭載のために小形化しなければならず、また動揺が激しいために技術的に実現が難しくなっている。今回の AUV 搭載の地球局は、すべての装置が潜水しても大丈夫なように防水処置を施した。AUV が浮上した際にアンテナが海面に出ることで、人工衛星と通信が可能となる。AUV 「MR-X1」に搭載したアンテナシステムを図 13 に示す。

本実験は 2009 年 3 月に実施した。JAMSTEC 横須賀本部に基地局を設置し、熱海市の初島に中継局を設置、JAMSTEC の研究船「なつしま」に「MR-X1」を搭載した。図 12 でいえば、左側が初島に相当する。探査機は海中で観測を自律して行った後に、浮上して ETS-VIII と通信を行うことになるため、探査機は海中ではなく洋上にある。また、衛星遠隔制御のために「なつしま」を介することはない。「なつしま」を初島沖約 2 km に位置させて、「MR-X1」を展開し、浮上中の「MR-X1」と ETS-VIII と中継局経由で JAMSTEC 横須賀本部とリンクを張り、横須賀本部から、「MR-X1」の状態確認、あらかじめ取得した画像のアップロード、「MR-X1」のカメラによるリアルタイム映像モニタ、そして「MR-X1」への新たなミッションデータのダウンロード実験を行った。ミッション指令により「MR-X1」がその場で回頭を行った際に、一部衛星回線が切れたものの、それ以外では常時良好な通信状態が確保され、浮上した AUV

図 13 アンテナを搭載した潜航前の「MR-X1」

の遠隔制御が静止衛星を用いて行えることが確認できた。

4.3 リアルタイム深海映像伝送

2010 年 1 月 23 日～2 月 10 日までの 19 日間の航海(図 14)の一部で ETS-VIII 利用実験を実施した。JAMSTEC の研究船「なつしま」に試験装置一式を搭載し、別府湾まで航海した。別府湾沖ではデジタルデバイド解消の効果を確認するための通信試験と、深海探査機の潜航中の映像伝送試験を実施した。横須賀本部では研究者がその映像を共有することができた。

別府湾の海底は 100 m より浅いところがほとんどで、海底が碗形をしており軟泥質の堆積物がある。古気候研究者によれば黄砂などが堆積しており、堆積した泥の柱状サンプルを行い解析することで、どの時代にどれだけ黄砂が運ばれたかを見積もり、風の歴史が分かるという。そこで、「MR-X1」に柱状採泥機を搭載し、世界で初めてとなる AUV による採泥試験を行った。その記念すべき映像を ETS-VIII によって JAMSTEC 横須賀本部の研究室へリアルタイム中継した。このときの伝送速度は 384 kbit/s で Motion-JPEG (Joint Photographic Experts Group) により、0.5 ～ 1 秒程度の NTSC (National Television System Committee) サイズの画像を伝送できた。

2009 年 10 月と 2010 年 8 月には、より高速な映像伝送を実現するために、独立行政法人宇宙航空研究開発機構 (JAXA) の協力を得て、WINDS による深海ハイビ

ジョン映像伝送試験を実施して成功した。2009 年の試験は JAMSTEC の研究船「白鳳丸」に深海生物追跡調査ロボット「PICASSO」⁽¹⁸⁾ を搭載し、東京湾内金田湾にて 13 Mbit/s のレートで、ハイビジョン映像と標準画像映像 3 本を、JAMSTEC 横浜研究所と JAXA 筑波宇宙センターに同時中継した。JAXA では同日一般公開を行っており、一般の方々に貴重な深海映像を届けることができた⁽¹⁹⁾。

2010 年の試験では、WINDS の移動体免許を取得し、相模湾での実運用中の AUV で撮影した映像を更に高速な 32 Mbit/s の速度で伝送することができた。このときは作業用 AUV「MR-X1」による観測機器の自律設置作業に世界で初めて成功した際の映像を JAXA 筑波宇宙センターに伝送した⁽²⁰⁾。

図 14 「なつしま」の航跡と通信実験位置

5 むすび — AUV 開発の今後

自律形無人探査機は海底資源開発に関する国の施策で取り上げられ、まさに今が旬である。その AUV と要素技術の開発状況をレポートした。2010 年度で国家基幹技術が終了し、LCAUV のために開発を進めた要素技術開発が終わる。これらの成果は資源探査 AUV の重要な部品として使用される予定である。現状のニーズからは大形の LCAUV の開発よりも、小形 AUV を複数開発し、Multi-AUV システム (図 15) として、資源探査を効率的に進めることが求められている。Multi-AUV システムにおいては、現状の技術では 100% バグなしで AUV を動作することは不可能と考えられることから、航行中の AUV の監視が必要となり、そのために深海から陸上までのシームレスな通信環境構築が必要と考えている。複数の AUV を用いた資源探査が開始されるのは 2014 年度以降の見込みである。それまでにこれらのシステム

図 15 Multi-AUV のイメージ図

が確実に用意でき運用できるように、現状の技術課題を克服し、かつ新たに必要な技術開発を進めていきたい。

また、将来的には LCAUV のニーズもあると思われることから、大形海洋プラットフォームと小形多数機プラットフォームの二つのシステムを想定し、両方のシステム構築に必要な要素技術も研究開発する必要があると考えている。

自律形無人探査機は非常に多くの分野の科学と技術で構築される一つの大形統合システムであり、まだまだ我々だけの力では不足の部分がある。本誌への掲載を機に、通信関係の皆様からの御助言や御協力を得られたら非常に喜ばしい。

謝 辞

ここに紹介した無人探査機と要素技術の開発並びに試験においては、非常に多くの方々の御支援と御協力があり、成功することができました。誌面をお借りして、関係した皆様に深くお礼を申し上げます。

特に海域試験においては、JAMSTEC の船舶を運行されている皆様方、船上で支援頂いた職員と日本海洋事業、マリンワークジャパンの皆様方に感謝致します。また、衛星通信試験では JAXA と関連企業、電波産業会、ETS-VIII 利用実験協議会、独立行政法人情報通信研究機構の皆様方と、東大臨海実験所、つくば大学下田臨海実験センターの職員の皆様とに多大なる御支援を頂戴致しました。

文 献

- (1) T. Nakatani, T. Ura, Y. Ito, J. Kojima, K. Tamura, T. Sakamaki, and Y. Nose, "AUV "TUNA-SAND" and its exploration of hydrothermal vents at Kagoshima Bay," OCEANS 2008 - MTS/IEEE Kobe Techno-Ocean, pp. 1-5, 2008.
- (2) 芦寿一郎, 森田澄, 清川昌一, 月岡哲, "泥火山の微細構造と発達過程: 深海巡航探査機「うらしま」によ

る熊野トラフ海底調査,” 日本地質学会学術大会講演要旨集, no. 114, p. 99, Sept. 2007.

- (3) 笠谷貴史, 月岡哲, 山本富士夫, 百留忠洋, 澤隆雄, 吉田弘, 石橋正二郎, 田原淳一郎, 木下正高, 青木太郎, “深海巡航 AUV「うらしま」によって得られた相模湾初島沖の海底地すべり音響イメージ,” 海洋調査技術, vol.19, no.2, pp.11-17, 2007.
- (4) T. Aoki, S. Tsukioka, H. Yoshida, T. Hyakudome, S. Ishibashi, T. Sawa, A. Ishikawa, J. Tahara, I. Yamamoto, and M. Ohkusu, “Advanced technologies for cruising AUV Urashima,” Trans. Int. J. Offshore and Polar Engineering, vol. 18, no. 2, pp. 81-90, 2008.
- (5) H. Yoshida, S. Takao, T. Hyakudome, S. Ishibashi, H. Ochi, T. Shimura, J. Tahara, T. Watanabe, T. Inoue, S. Tsukioka, and T. Aoki, “Conceptual design and key technology development of a long-range underwater vehicle traveling over thousands kilometers,” Proc. ASME 28th Int. Conf. on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, May 31-June 5, 2009, Honolulu, Hawaii, 2009.
- (6) 2006/7/14 海洋研究開発機構プレスリリース
- (7) 2007/12/14 海洋研究開発機構プレスリリース
- (8) 日本経団連タイムス, no.3020, Nov. 11, 2010.
- (9) J. C. Gascard, J. Festy, and H. Le. Goff, “Exploring arctic transpolar drift during dramatic sea ice retreat,” EOS, vol. 89, no. 3, pp. 21-23, 2008.
- (10) H. Yoshida, T. Hyakudome, N. Fujiya, S. Konno, M. Oomiya, K. Ozawa, and T. Aoki, “Improvement of a high energy type lithium-ion battery system for unmanned underwater vehicle,” Proc. 19th (2009) Int. Offshore and Polar Engineering Conference Osaka, Japan, p. 690, June 21-26, 2009.
- (11) H. Yoshida, T. Hyakudome, S. Ishibashi, T. Sawa, S. Tsukioka, T. Aoki, T. Tani, M. Iwata, and T. Moriga, “A compact high efficiency PEFC system for underwater platforms,” ECS Trans., vol. 26, issue 1, pp. 67-76, 2010.
- (12) 石橋正二郎, “回転運動がもたらす慣性航法誤差の軽減効果,” 海洋理工学会誌, vol. 13, no. 1, pp. 35-40, 2008.
- (13) T. Shimura, H. Ochi, and Y. Watanabe, “Time-reversal communication in deep ocean: result of second at-sea experiment,” Jpn. J. Appl. Phys., vol. 47, no. 5B, pp.4360-4365, 2008.
- (14) 2006/7/14 海洋研究開発機構プレスリリース
- (15) H. Yoshida, T. Sawa, T. Hyakudome, S. Ishibashi, and J. Tahara, “MR-X1—An AUV equipped with a space distributed CPU system and a satellite telecontrol interface,” Proc. Oceans 2009 Europe, pp. 1-5, May 11-14, 2009, Bremen, 2009.
- (16) H. Yoshida, T. Sawa, T. Hyakudome, and S. Ishibashi, “A remote control system for underwater vehicle using engineering test Satellite- VIII,” Proc. Oceans/Techno Ocean 2008.
- (17) 2008/12/10 海洋研究開発機構プレリリース
- (18) H. Yoshida, D. J. Lindsay*, H. Yamamoto, S. Ishibashi, T. Hyakudome, H. Okuno, and T. Uemura, “Development of the AUV/UROV “PICASSO”, ” Proc. ISOPE 2008.
- (19) 2009/10/20 JAXA/JAMSTEC 共同プレスリリース
- (20) 2010/8/18 JAXA/JAMSTEC 共同プレスリリース

(平成 23 年 1 月 18 日受付, 4 月 16 日再受付)

吉田 弘

伊豆大島出身。1985 都立工業高専卒。無線機システムメカ勤務を経て金沢大大学院自然科学研究科進学。1999 博士(理学)。専門は電磁物理学。2002 海洋科学技術センター(現 独立行政法人海洋研究開発機構海洋工学センター)入所。入所後は無人探査機の研究開発に携わる。これまでに 6 機の無人探査機を世に送り出した。現在は資源探査のための自律形無人探査機の開発プロジェクトリーダー。3 機を同時に開発するという難業に取り組む中。ライフワークとして深海環境での電磁物理についても研究を進めている。

百留忠洋

福岡県出身。1989 福岡県立築上中部高卒。1995 九工大卒。2000 九大学院総合理工学研究科博士後期課程了。博士(工学)。専門は制御システム工学。2000 海洋科学技術センター(現 独立行政法人海洋研究開発機構海洋工学センター)入所。入所後は無人探査機の研究開発、探査機を構成する要素技術の動力源、構造部材等の研究開発に従事。現在は資源探査のための自律形無人探査機の開発プロジェクトに携わる。探査機技術グループサブリーダー。機械的な流体特性と生物の形状を融合した無人機を開発できればと夢想中。

石橋正二郎

1975 静岡県出身。1998 東京商船大・商船システム工学課程卒。2003 同大学大学院商船学研究科了。博士(工学)。2003 海洋科学技術センター特別研究員を経て、現在、独立行政法人海洋研究開発機構海洋工学センター技術研究主任。これまで複数の遠隔式、自律式の無人探査機開発に従事。慣性航法装置、マニピュレータシステム、CPU 制御システムの研究開発を担当。

澤 隆雄

1972 群馬県出身。1998 名大大学院工学研究科修士課程了。2007 電気通信大学院電気通信学研究科博士課程了。博士(工学)。現在、独立行政法人海洋研究開発機構海洋工学センター技術研究主任。専門は海中工学及びソナー。

志村拓也

1993 東大・工・船舶海洋卒。1995 同大学大学院工学系研究科船舶海洋工学専攻修士課程了。同年、独立行政法人海洋研究開発機構海洋工学センターに入所。2004 から位相共役波を用いた音響通信の研究に従事。2009 博士(工学) 東大。