

**海から迅速な展開が可能な陸海域
自律調査システムの開発に関する研究**

報 告 書

平成27年3月31日

東京海洋大学海洋工学部
一般社団法人日本海事検定協会
(検査第一サービスセンター)

目 次

1. 研究目的および概要	2
2. 平成 26 年度実施内容	4
2.1 マルチコプタへの組み込みコンピュータの搭載	4
2.2 海上飛行通信試験	6
2.3 電波通信システム・ソフトウェア開発およびシミュレーション環境構築	8
2.3.1 ソフトウェア開発	8
2.3.2 シミュレーション環境構築	8
2.4 小型・航行型 AUV 開発前半	10
2.4.1 ハードウェア設計	10
2.4.2 搭載品	12
2.4.3 電気系統設計	13
2.4.4 前半の進捗状況	13
2.5 自律小型船開発	15
2.5.1 画像処理関連	15
2.5.2 Wi-Fi 通信関連	16
2.5.3 船舶関連	20

1. 研究目的および概要

震災や事故などで起きる異変を迅速に調査し、状況を正確に把握することは対応策を講じるための初期段階に非常に重要である。我が国がこれまでに経験した大震災では、交通網が寸断されて当該区域に近づくことが困難になったり、陸のインフラストラクチャが破壊されることにより電気の供給ができなくなるなどの問題が具体的に浮かび上がった。

海や河川に面する陸域や島嶼地域では、海域からの迅速なアクセスが可能であり、震災などの非常時にはこれを有効に活用することが可能と考えられている。船舶の発電機から陸へ給電する試みなども始まっている。本研究は、陸域や沿岸域、あるいは接近が危険な活動中の海底火山海域や石油流出の起きた海域などを想定し、ここに海上の船舶を起点として迅速に展開する無人自律型の調査システムを開発するものである。

本研究で開発する調査システムは、空へ展開するマルチコプタ編隊、海上へ展開する自律小型船、海中へ展開する自律型水中ロボットにより構成する。マルチコプタとは4枚、6枚など複数のロータを持って安定した飛行が行える飛行体であり、無人空撮プラットフォームとして知られるようになっている。この役割は調査域を迅速に撮影してリアルタイムにこれを船舶へ無線通信により伝送するとともに、複数台のマルチコプタを空へ展開して、長距離のアドホック通信網を確保するために用いる。自律小型船は、海上にある船舶では接近困難な海域や沿岸の浅海域へ展開して、海上から画像撮影を行ったり、環境センサなどにより空中や水中のモニタリングを行ったり、ソナーを使って海底の概要を調査したりする。海上の船舶から陸へ給電するケーブルを導くためのヒービングラインを陸まで届け渡す役割も想定する。自律型水中ロボットは、水中や海底の様子をソナーやカメラを使って詳細に把握する役割を果たす。

本研究で提案するシステムは、海上の船舶を基点に展開することを想定している点が特徴であり、船舶から手の届かないところ（浅い沿岸域や危険域）に、自律観測システムを展開するものである。システムの構成要素それぞれは自律的な自動制御機能を持つとともに、これにより構成される調査システムはネットワークとして、船舶側から統括制御する。すなわち、空中、海上、水中に展開するシステムは、それぞれ個別に調査行動を指示することができ、船舶からその個体までは、空中と水中のネットワークで通信が確保されるように自動的に配置が再構成される。開発するシステムの概念図を図1に示す。

具体的には、本学の保有する練習船をモデルケースとして、この調査システムの基本形を構築する。このシステム開発にあたっては、これまでに培ってきた小型船や自律型水中ロボットに関する技術および資産を有効に活用しながら、3年間で開発するテストシステムを使った海域試験により自律調査システムの基礎技術確立を目指す。

本提案の調査システムが開発されれば、災害時の対応や危険地域の調査のみならず、国民の生活に不可欠な物資を輸送する商船の安全運航を確保するための、有効かつ安価なツールとしても活用できる。すなわち、霧の立ちこめたような視界が悪い海域や、夜航海にあつて、進路の前方上空にマルチコプタを飛行させ、赤外線カメラにより監視を行うと、目視では発見できないものまで、はっきりと確認できるようになる。大型のコンテナ船、タンカー、LNG船などでは、進路前方の広い範囲に死角が生じるが、これをマルチコプタのカメラで補うことも可

能である。視点を変えて、監視の対象を船舶に移すと、マルチコプタにより大型船の積荷の状態や、船体外板から艀装の状態までを迅速に撮影したり、センサを搭載して船舶の煙突から排出されるガスをモニタリングすることも可能となり、船舶の検査にも活用が考えられる。外航船の場合には、海賊船が自船に接近する前に対策を講じるための監視システムとしての役割も想定され、物資輸送の安全確保に貢献できる。

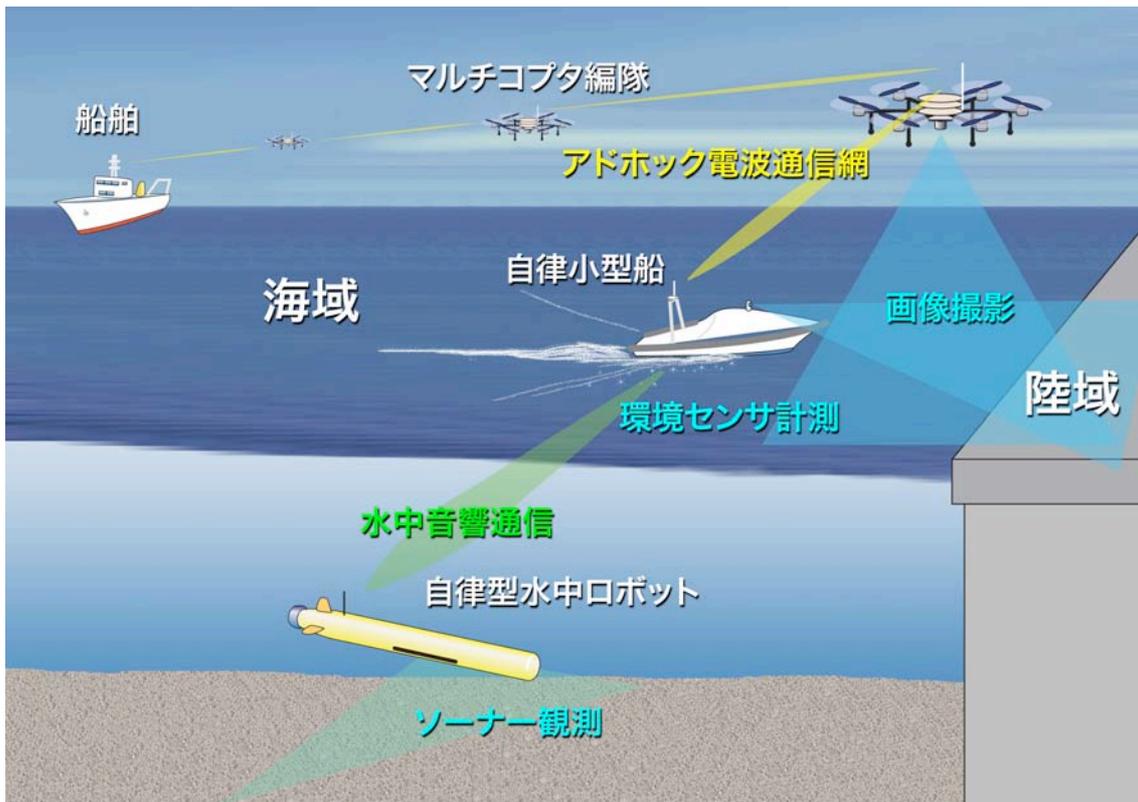


図1 開発するシステムの概念図

2. 平成 26 年度実施内容

今年度は、①マルチコプタへの組み込みコンピュータの搭載、②海上飛行通信試験、③電波通信システム・ソフトウェア開発およびシミュレーション環境構築、④小型・航行型 AUV 開発前半、⑤自律小型船開発について実施した。

タイムラインを表 1 に示す。

表 1 平成 26 年度の実施計画

	H26			
マルチコプタ開発				
	組込コンピュータの搭載改造と飛行試験			
	海上試験			海上試験
電波通信システム開発				
	試験用通信ソフトウェア実装			
		陸上・海上通信試験		
自律小型船開発 (本研究関連分)				
	自律航行機能実装			
自律型水中ロボット開発				
	詳細設計			
		ハードウェア製作(前半)		
			ソフトウェア設計	
				ソフトウェア実装

2.1 マルチコプタへの組み込みコンピュータの搭載

昨年度構築した 4 枚翼機に、自律機能とマルチホップ通信機能を実装するため、組み込みコンピュータを搭載した。機体の運動制御とあらかじめウェイポイントを与える自動飛行制御を行ういわゆるオートパイロット用のコンピュータとしては、3D Robotics 社の APM2.6 を搭載しており、ラジコン受信機からの入力とテレメトリ通信装置からの指示を飛行中に切り替え可能である。ラジコン受信機と APM の間に東京エレクトロンデバイス株式会社の

TB-7Z-020-EMC (GEMINI) を挿入し、GEMINI にて動作するソフトウェアにて、ラジコン受信機からの信号をそのままスルーする動作と、GEMINI による自律航行制御を切り替えられるようにした。さらに、GEMINI には 920Mhz 帯の無線通信装置である双葉電子工業株式会社の FEP01 通信モデムを接続して、複数機体と船舶との相互通信を可能とした。マルチコプタへ実装した様子を図 2 に、通信機の構成を図 3 に示す。

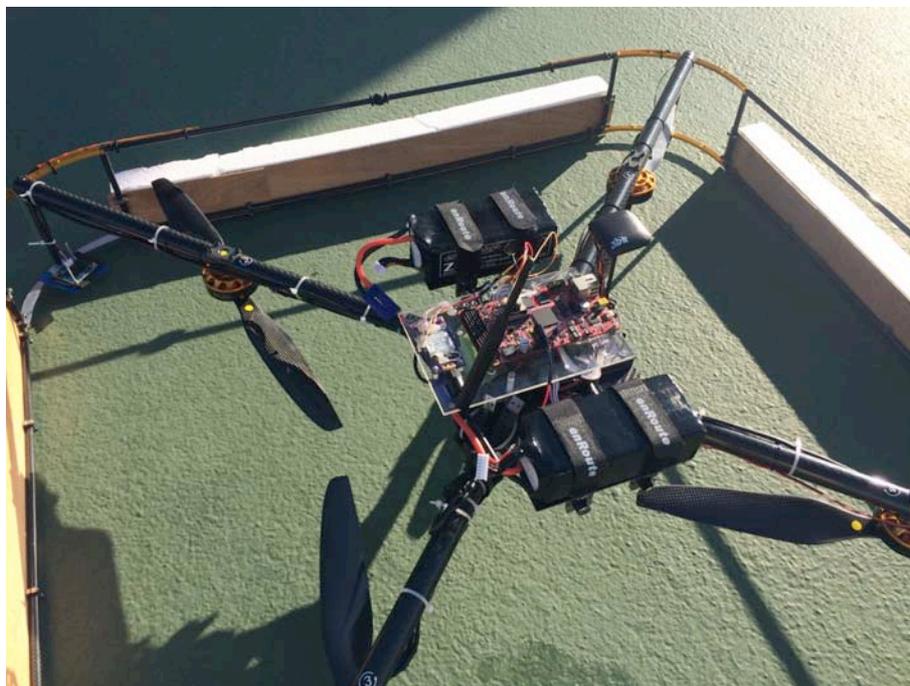


図 2 組み込みコンピュータを実装したマルチコプタ

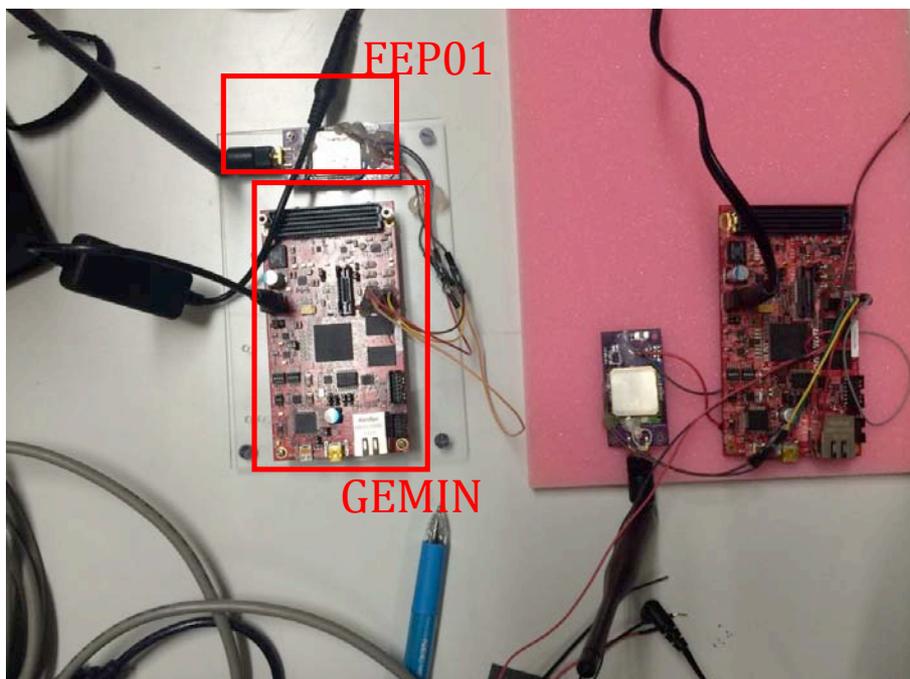


図 3 組み込みコンピュータと通信装置

2.2 海上飛行通信試験

海上の船舶と飛行するマルチコプタとの通信では、電波の性質から飛行高度と距離、および姿勢に応じて通信エラーの頻度が変化することが予想される。複数の機体が編隊で通信ネットワークを構築する場合、この特性をあらかじめ把握しておき、電波通信の状況を良好に保つ位置関係を保持しながら編隊を構成する必要がある。このための基礎データを収集するために、東京海洋大学の保有する練習船汐路丸を使って、平成 26 年 7 月に千葉県富浦湾にて海上飛行通信試験を行った。

汐路丸デッキからマニュアルにて離船と着船を行い、あらかじめ設定したウェイポイント間を自動飛行させ、汐路丸船橋に設置した通信装置とマルチコプタに搭載した通信装置間で、自動的に通信を繰り返しながら通信状況を記録した。自動飛行の際には万が一に備えて、マニュアル操縦用のラジコンプロポを持つオペレータが乗った小型船にて伴走した。

実験の様子を図 4、5、6 に示す。平成 27 年 3 月にも神奈川県八景島沖にて実験航海を行ったが、期間中強風のために飛行通信試験は断念した。



図 4 汐路丸から飛び立つマルチコプタ



図5 小型船にてマルチコプタに伴走している様子



図6 汐路丸へ帰還していくマルチコプタを見守る

2.3 電波通信システム・ソフトウェア開発およびシミュレーション環境構築

2.3.1 ソフトウェア開発

マルチコプタによるマルチホップ通信ネットワーク構築のために、GEMINIにおいて通信パケットを自動処理する仕組みを構築する。このために必要となるプロトコルスタックを設計・実装した。APMではMavlinkと呼ばれる通信プロトコルが使用されており、飛行状態を地上局と機体との間でやり取りする仕組みになっている。このプロトコルをパイロードとして、マルチホップのためのヘッダを付加した独自のパケットを定義する。通信モデムであるFEP01を介してGEMINIに到達したデータは、このヘッダ情報に基づいて処理され、Mavlinkの形式でAPMに受け渡される。船舶と複数のマルチコプタはこの独自パケットのヘッダ情報を使ってマルチホップ機構を実現する。パケットの流れを図7に、プロトコルスタックを図8にそれぞれ示す。

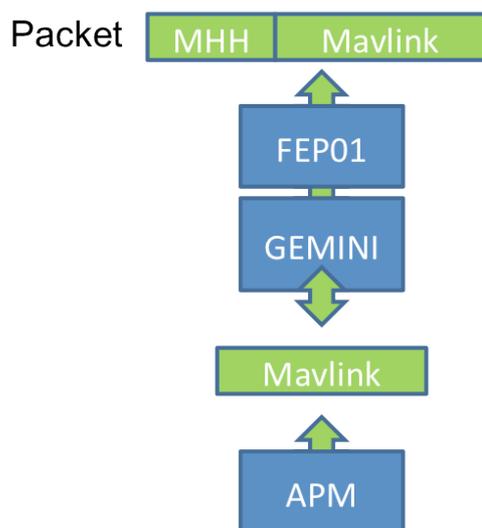


図7 パケットの流れ

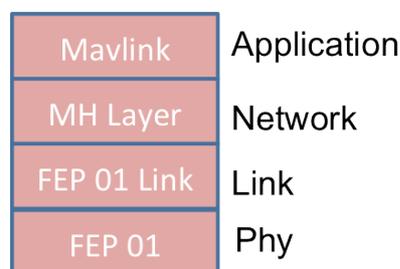


図8 プロトコルスタック

2.3.2 シミュレーション環境構築

マルチホップ通信ネットワークを開発するにあたり、試験を行いながらシステムをブラシアップしていく作業は必須である。しかしながら、通信エラーが起きる実環境において複数のマルチコプタを飛行させながら試行錯誤を繰り返すことは、マンパワーの不足と墜落などのリスクを伴うという課題を抱えることになる。このため、できる限り通信エラーの状況を現実の環境に近づけた形で再現しながら実験できるシミュレーション環境が必要である。

シミュレーション環境は、PC上で動作するArduCopterのSITL(Software in the loop)シミュレータと実物のFEP01通信機をMH(マルチホップ)層のドライバソフトウェアを介して

接続したものをマルチコプタ 1 機分として、3 機分用意し、地上局に使用される Mission Planner と呼ばれるソフトウェアをインストールした PC を介して、マルチホップ通信環境とする。各通信機へはそれぞれのマルチコプタの仮想の相対位置・姿勢に応じて、あらかじめ計測した通信エラーを MH 層で注入し、海上でのマルチホップ通信環境を模擬する。このシミュレーション環境の概念図を図 9 に、実際に構築したシステムを図 10 に示す。

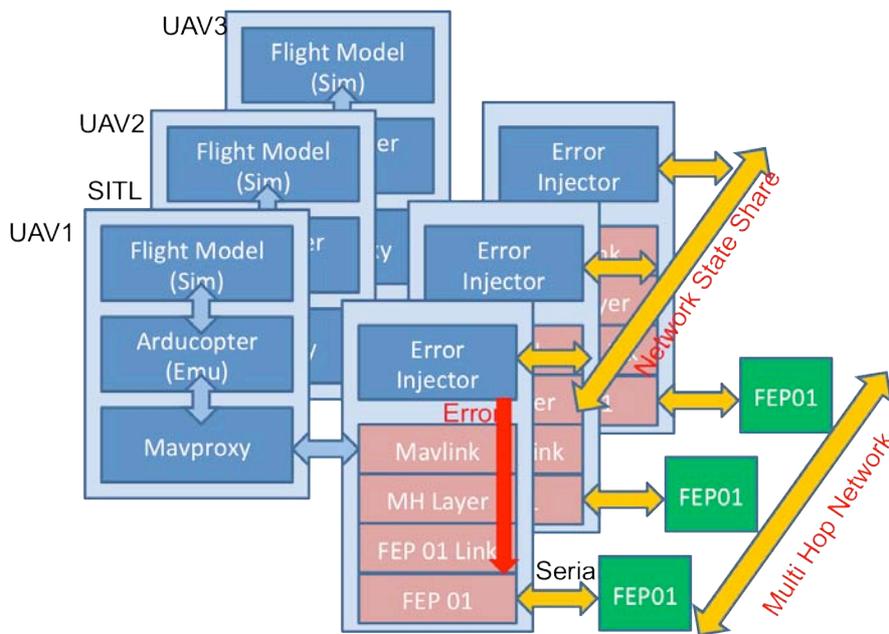


図 9 シミュレーション環境の概念図

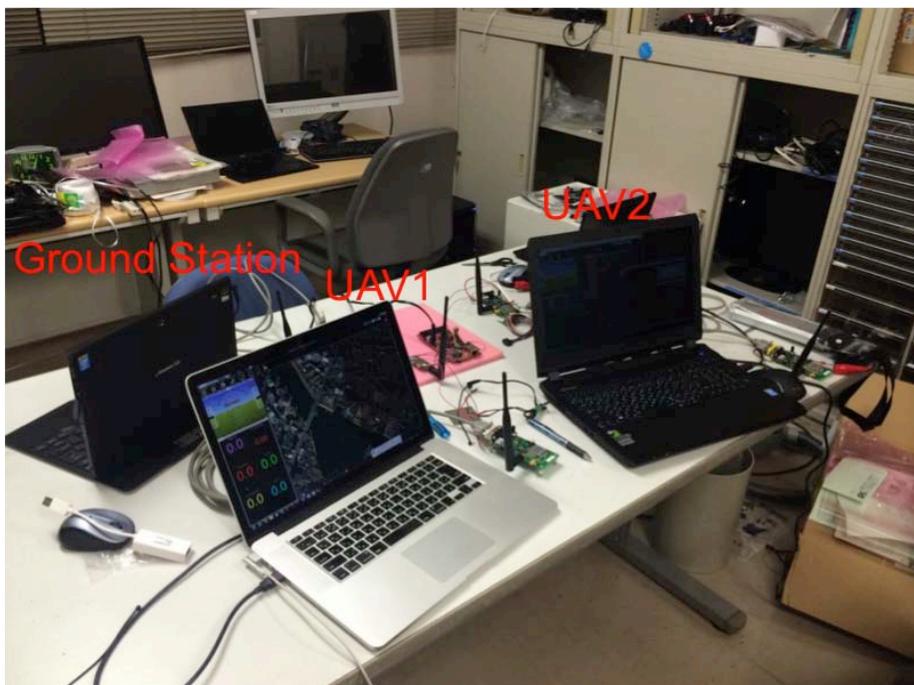


図 10 構築したシミュレーション環境

2.4 小型・航行型 AUV 開発前半

2.4.1 ハードウェア設計

AUV の設計にあたっては、以下を設計要件とした。

- ・ 数人が人力で運搬、着水、揚収できるサイズと重量であること
- ・ 本研究に必要な水中通信機能を持つこと
- ・ ペイロードセンサとして最低限海底を撮影するカメラを有すること
- ・ 極力水中コネクタは少なくし、圧力容器が構造部材を兼ねること
- ・ 極力浮力材を用いずに、圧力容器の浮力で成立する構造とすること
- ・ 水深 100m までの海水および淡水で使用できること

設計した小型・航行型 AUV の概略図を図 11 に示す。円筒形の圧力容器をリングで連結する構造とし、鏡蓋の数は必要最低限として軽量化を図る。機首から順に頭部、カメラセクション、ドップラ式速度計 (DVL) および音響通信用トランスデューサセクション、電気回路およびバッテリー搭載セクション、照明ライト中間セクション、舵および推進器セクションで構成する。頭部および中間セクションは内部に水が満ちる構造で、前後は鏡蓋で区分けする。カメラセクション、DVL・音響通信セクション、主要機器セクションまでは空気で満たされる耐圧区画で、蓋では区切らずに貫通させる。舵および推進器セクションは、軸を貫通させて、舵とプロペラを回転させるため、油漬けによる均圧機構とする。

機器を搭載するために容器の肉厚が厚く、複雑な機械加工を必要とする箇所は重量の軽量化と加工性を考慮してポリアセタール樹脂 (POM) を使用する。電気回路とバッテリーを搭載する主要セクションは、構造部材としての強度を確保しつつ加工性を考慮してアルミニウム合金を使用する。

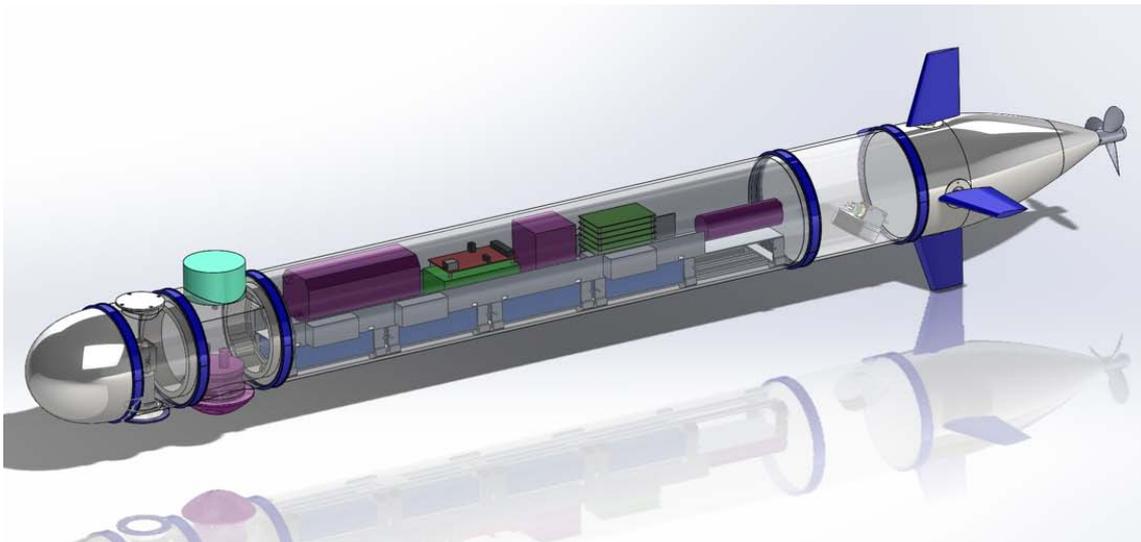


図 11 設計した小型・航行型 AUV

後述する搭載品のサイズ・重量から、AUV に必要な容積を確保しつつ、かつ全体の重量と

浮量を考慮して圧力容器の設計を行った。以下に各部の3次元設計データを示す。



図 12 カメラセクションおよび照明ライト

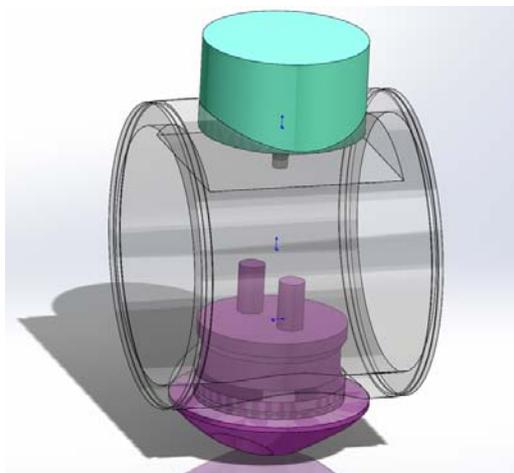


図 13 ドップラ式速度計 (DVL) および音響通信用トランスデューサセクション

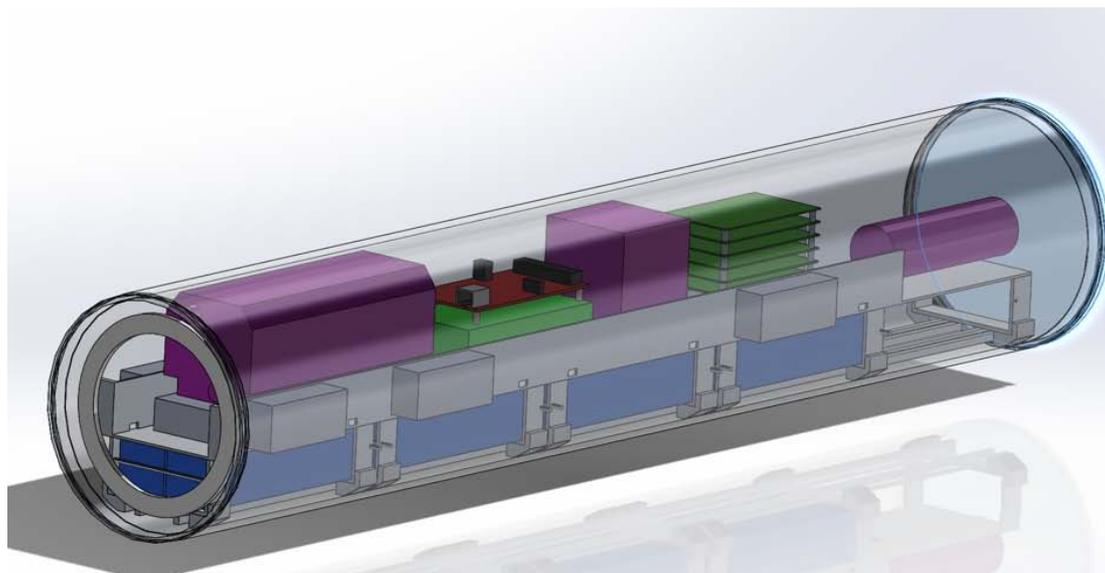


図 14 電気回路およびバッテリー搭載セクション

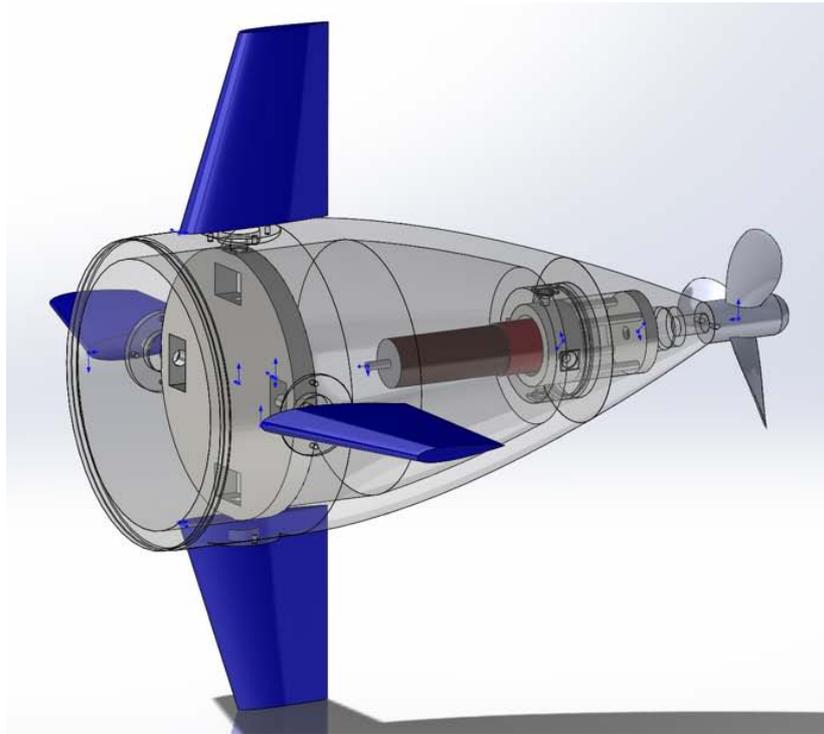


図 15 舵および推進器セクション

2.4.2 搭載品

搭載品は、研究室に保有する資産を有効活用するため、サイズと重量があらかじめ与えられるものと、設計に当たり機種選定を行って調達する物とがある。主要な搭載品を以下に示す。

A. 航法系

- ・ ドップラ式速度計 (Doppler Velocity Log : DVL)
対地速度、対水速度、高度を計測する。
- ・ 姿勢方位センサ (Attitude and Heading Reference System : AHRS)
内蔵する振動ジャイロと加速度センサにより、ロール、ピッチ、ヨーの角度および角速度、XYZ 軸に関する加速度および磁気を計測する。機体の姿勢を求めるもの。

B. 通信系

- ・ 音響通信モデム
船上や海底のモデムと音波を使ってデータ通信を行うもの。
- ・ 光ファイバ通信装置
主に開発期のデバッグ用、データの取り出し用のために光ファイバを介したイーサネット通信を行うもの。

C. 駆動系

- ・ プロペラ主軸用 DC ブラシレスモータ

- ・ 舵用高トルク・ブラシレスサーボモータ

D. 電源系

- ・ リチウムポリマ二次電池および保護回路
コストを抑える観点から市販されているラジコン用リチウムポリマ二次電池を使用し、安全のために過放電等の防止用保護回路を搭載する。
- ・ DC/DC コンバータ
電池から電源を得て、各機器に必要な電圧に変換して供給する。機器への電源スイッチの役割を兼ねる。

E. ペイロードセンサ系

- ・ CCD カラーカメラ
海底面の撮影をするために下向きの CCD カラーカメラを搭載する。
- ・ LED 照明
高輝度の面発光 LED ユニットを圧力容器に入れて使用する。

F. コンピュータ系

- ・ 自律行動制御および運動制御用組み込みコンピュータ
研究室にて開発した制御用コンピュータ「KOLABOARD」を搭載する。アナログ入出力、デジタル入出力、RS232C シリアル通信、イーサネット通信等の I/O を搭載し、リアルタイム OS である T-Kernel で動作させる。
- ・ 画像処理等用 FPGA ボード
マルチコアに搭載した GEMINI を搭載し、CCD カメラからの画像を、低消費電力にて高速に処理する。水中音響通信モデムを介して小型船等と通信を行う。

2.4.3 電気系統設計

搭載機器の電気容量と電圧、市販ラジコン用リチウムポリマ二次電池の使用、通常の電源 ON・OFF と水中での非常時電源カット等、さらに駆動系や通信系からの電気ノイズを考慮して、系統毎に DC/DC コンバータを設け、この DC/DC コンバータに機器のスイッチの役割を兼ねさせる。設計した電源系統の回路図を図 16 に示す。

2.4.4 前半の進捗状況

構造系のハードウェアとしては、大型の樹脂加工品を除き加工を終了した。次年度に残りのパーツを加工すると胴体全体が揃う。搭載品の半分以上は既に揃えており、組み込み作業を実施している。次年度に残りの搭載品を調達して、全体の組み込み作業を完了する。

ソフトウェアに関しては、研究室のソフトウェア資産を活用して、基本的な計画を完了し、次年度に総合的に実装、組み込み、動作試験へと移行する予定である。

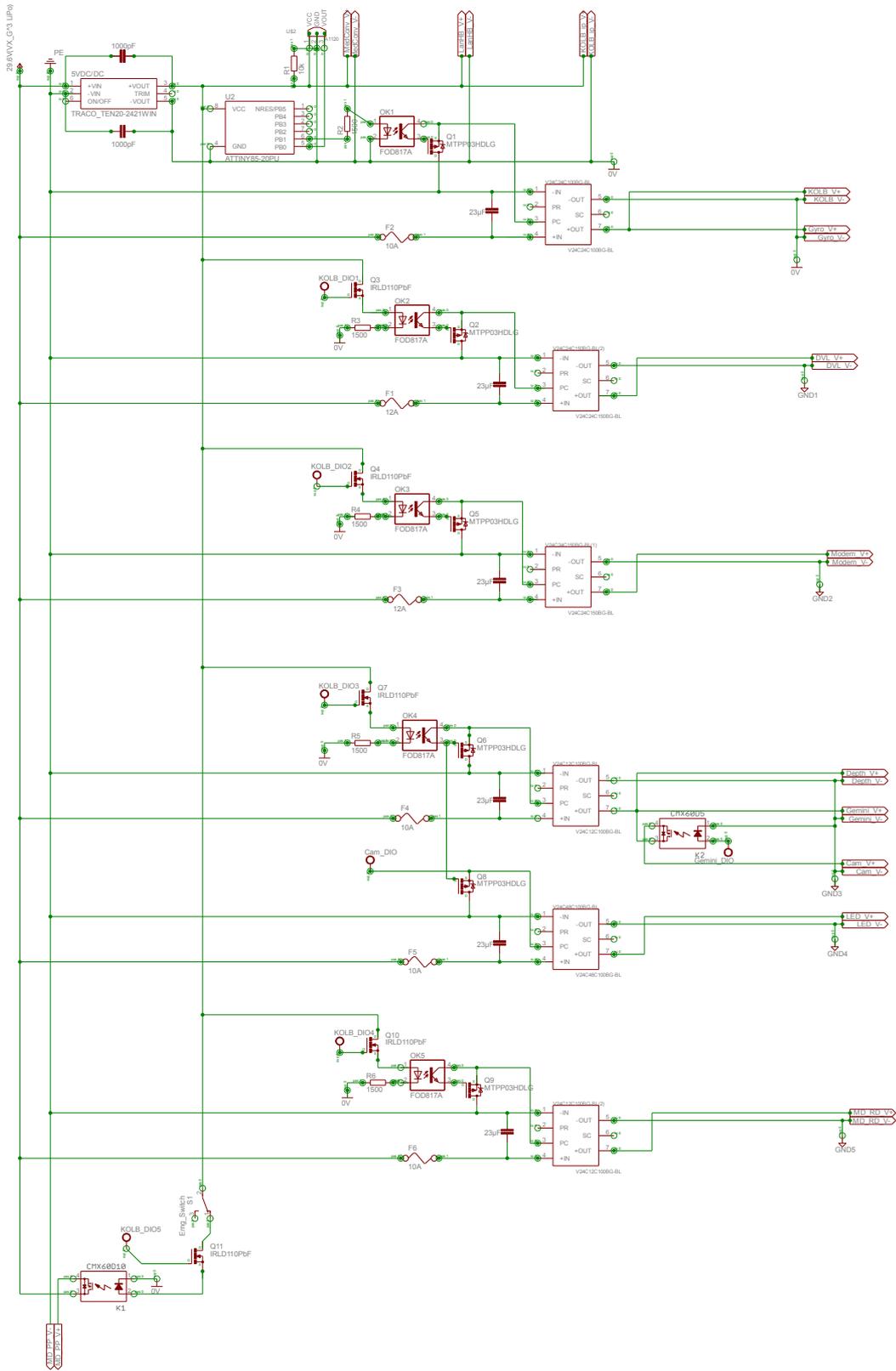


图 16 电源系统回路图

2.5 自律小型船開発

2.5.1 画像処理関連

船舶を自律航行させるためには、周囲の船舶がどちらの方向に移動しているかを認識することが重要である。人間であれば船舶の向いている方向を即座に認識できるため、どちらの方向に移動するか予測することは容易である。この機能を機械化するためには少々、データ処理を行う必要がある。レーダーを用いる場合、Target Tracking 機能のように自船の移動情報と時系列レーダー計測データを計算処理することが必要である。しかし、夜間であれば、船舶は航海灯を備えており左舷灯は赤、右舷灯は緑と決まっているので、これらの色を認識することができれば夜間において船舶の進行方向を容易に認識することができる。特に近年、0.001lux でもカラー映像を撮影することができ、明転する際もハレーションをほとんど起こすことなく追従することが可能な超低照度カメラが販売されている。これに加えて画像処理技術も非常に進歩しており、逆光や霧中においても画像処理を行うことによってある程度まで認識できるようになる。平成 26 年度は、これら機材のうち、画像処理装置に関して検証を行った。使用した画像処理装置は、(株) レッツコーポレーション製造の映像鮮明化装置 Pro である。ダイヤルによって処理具合を調整できる機器と、新型ではあるが三段階にしか調整できない機器の二種類を用いて比較を行った。検証には水中作業現場で撮影された水中映像を使用した。その結果、水中画像に関しては、微調整が必要であることがわかり、旧型のほうが有効であった。平成 27 年度は霧中・夜間等に船舶を運航し超低照度カメラならびに画像処理装置の洋上使用における自律船の視覚としての性能を検証する。



図 17 映像鮮明化装置 Pro (旧型)



図 18 映像鮮明化装置 Pro (新型)

2.5.2 Wi-Fi 通信関連

長距離 Wi-Fi 通信実験に関しては、GoNet 社製 GoBeam8000 を利用し実験を行った。GoBeam8000 は、フェーズドアレイ技術を用いたビームフォーミングによりアンテナの指向性を電子的に左右に振ることができるため、カタログ性能としては水平約 120° 垂直約 44° 距離最大約 1.5km 範囲の通信が可能となる。また、2.4GHz 帯と 5GHz 帯のデュアルバンドに対応し、さらに 3SS MIMO 方式採用・IEEE802.11n に対応することで最大 450Mbps の通信速度が可能である。

表 2 GoBeam 8000 仕様

通信規格	IEEE802.11a/j/b/g/n/(ac対応予定)
周波数帯	2.4GHz/5GHz
電源	PoE-48VDC
2.4GH zアンテナ	水平120° 垂直44° 13dB i
5GH zアンテナ	水平120° 垂直26° 13dB i
同時接続数	250台
寸法	幅29.5×高さ34.5×奥行き9cm
重量	5.55kg



図 19 GoBeam 8000 概観

本機器を用いて実際にどの程度の性能があるのか検証を行った。実験場所は見通し・電源を確保できることより本学グラウンドとし、計測は、2.4GHz 帯と 5GHz 帯ともに行った。アンテナ設置条件は以下の通りである。

- ①GoBeam8000 とパソコンの両方の高さを地表から 60cm 程度で向かい合わせた場合
- ②GoBeam8000 を地表から 50cm の高さに設置し、パソコンを地面に置いた状態で向かい合わせた場合
- ③GoBeam8000 を地表から 100cm の高さに設置し、パソコンを地面に置いた状態で向かい合わせた場合



図 20 設置条件①



図 21 設置条件②



図 22 設置条件③

実験結果を以下の図に示す。設置条件①と比較すると、2.4GHz 帯を使用した実験の場合、距離が遠くなると、極端に通信速度が遅くなっている。これは、距離による電波の減衰による影響だけでなく、実験場所が都内であり、周囲に他の Wi-Fi 電波が発信されていることによる影響もある。このため、5GHz 帯を使用した実験の場合には、それほど通信速度は遅くなっていない。また設置条件②、③において距離が長くなると通信ができなくなる理由はフレネルゾーンが確保できていないためと考えられる。これらの結果より、送信側、受信側ともにアンテナはできる限り高い位置に設置したほうが良いことが確認できた。

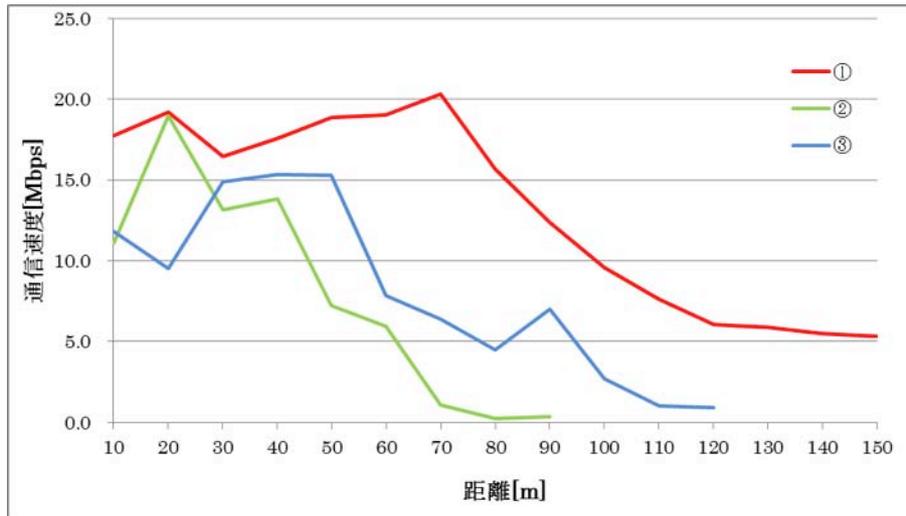


図 23 通信速度計測結果比較[2.4GHz]

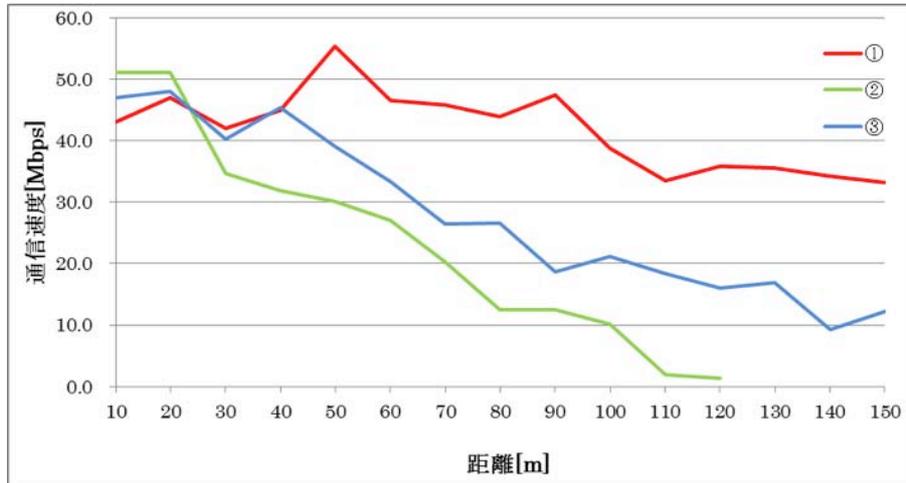


図 24 通信速度計測結果比較[5GHz]

さらに GoBeam8000 を本学第 3 実験棟 7 階（約高度 30m）に、パソコンをらいちょう S 船尾側の海面から 40cm の高さに設置し、2.4GHz 帯と 5GHz 帯を用いて通信を行った結果を示す。GoBeam8000 側に十分な高度があるため、距離 500m 程度でも 5GHz 帯において、5Mbps 以上の通信速度を得ることができた。2.4GHz 帯において距離 500m 付近で通信ができない理由は上記と同様、周囲の電波状況の影響を受けてしまったためである。さらに距離 500m 付近において、パソコンを水面から 1m 程度の場所に設置した場合、5GHz 帯において 25Mbps 以上の通信速度を確保することができた。



図 25 洋上実験環境

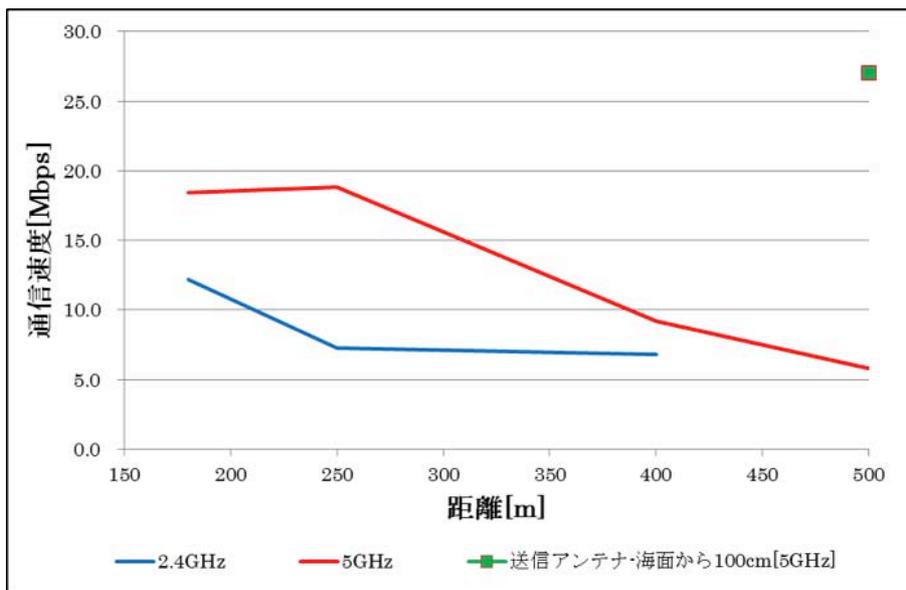


図 26 洋上通信結果

2.5.3 船舶関連

平成 26 年度は、2010 年に建造した初代電池推進船 らいちょう I についても無人操船が行えるよう改造を開始した。これまで、らいちょう I は人間が操船することを想定し、操舵機は手動であったが、これを自動で操船できるように操舵用のアクチュエータを増設した。さらに、電池の増設、GPS コンパスの設置、Wi-Fi 通信装置の整備を行った。今後、らいちょう N とあわせて、複数台の無人観測が行える船舶を利用した海洋観測システムとして利用できるようにするために、らいちょう I も整備する予定である。



図 27 電池推進船 らいちょう I

改造後のらいちょう I の主要目は以下の通りである。

表 3 らいちょう I 改造後仕様

全長	10.0 m
全幅	2.3 m
全深さ	1.2 m
電動機推進機出力	45 kW
蓄電池容量	52 kWh