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２８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 27 年度実施内容 **4**

2.1　小型・航行型 AUV 開発後半 **5**

2.1.1　ハードウェア 5

2.1.2　ソフトウェア 7

2.1.3　後半の進捗状況 9

2.2　自律小型船開発 **10**

2.2.1　Wi-Fi 通信関連 10

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際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既に始まっている。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ことである。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、ソー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ー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、夜航海にあって、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、船体外板から艤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。

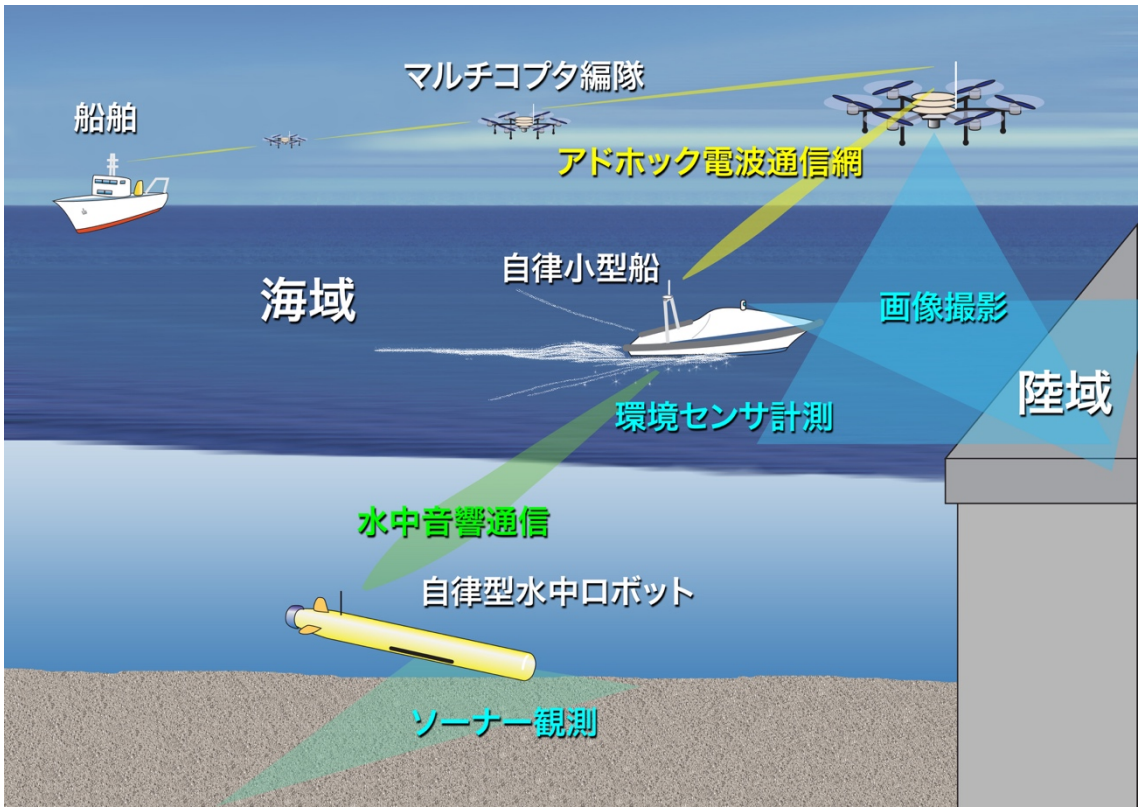

図１　開発するシステムの概念図

2. 平成 27 年度実施内容

今年度は、①小型・航行型 AUV 開発後半、⑤自律小型船開発について実施した。当初予定のタイムラインを表 1 に示す。表のうちマルチコプタとマルチホップ通信に関する項目について、検討と開発を進めてはいるものの、陸上にて飛行実験を実施することに制約がかかり、海上試験も含めて極端に実験機会が限られてしまったため、AUV の開発と自律小型船の開発にマンパワーを集中して実施をした。この部分は平成 28 年度に主に実施する。

表 1　平成 27 年度（28 年度含む）の実施計画

2.1　小型・航行型 AUV 開発後半

2.1.1　ハードウェア

設計した小型・航行型 AUV の概略図を図 2 および図 3 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。

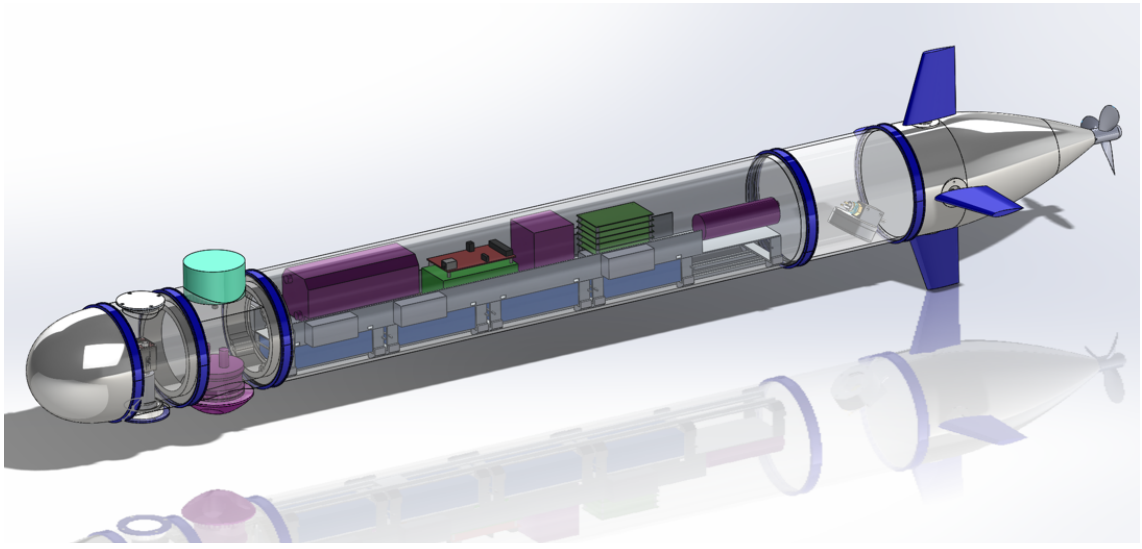

図 2　　設計した小型・航行型 AUV

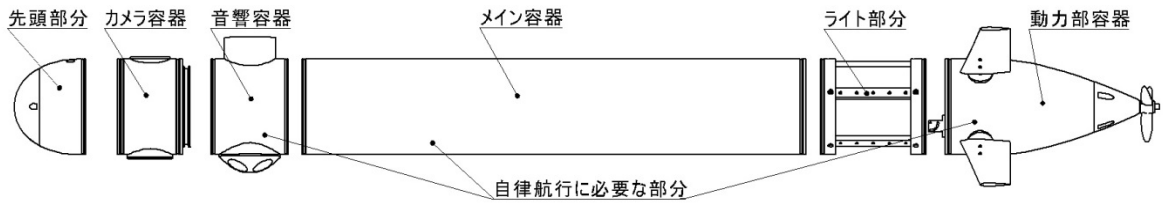

図 3　　AUV の構成図

この設計に基づき、今年度製作した AUV の写真を図 4 に、メイン容器の内部に搭載するために組み立てた装置一式を図 5 に、主推進器の内部機構を図 6、図 7 に示す。

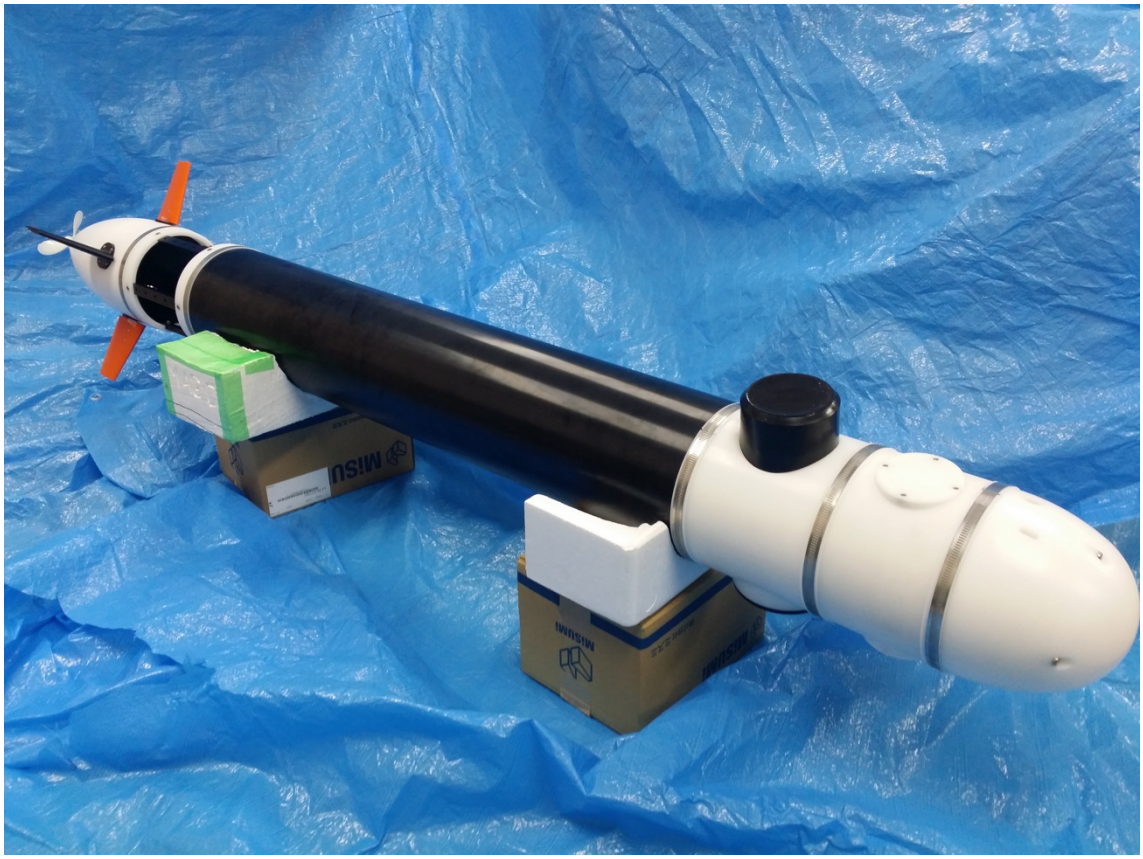

図 4　　製作した AUV

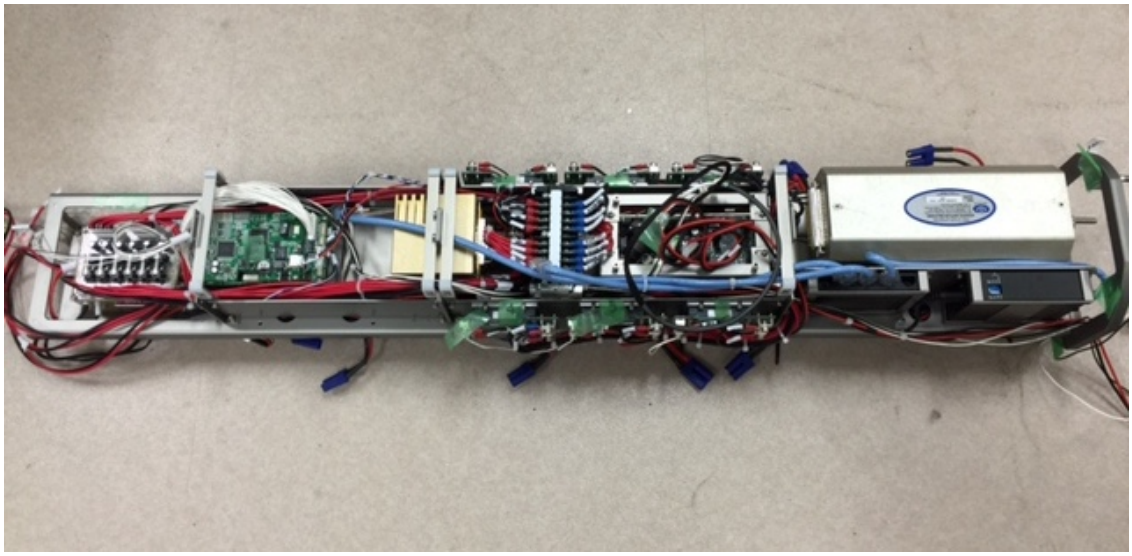

図 5　　内部機器

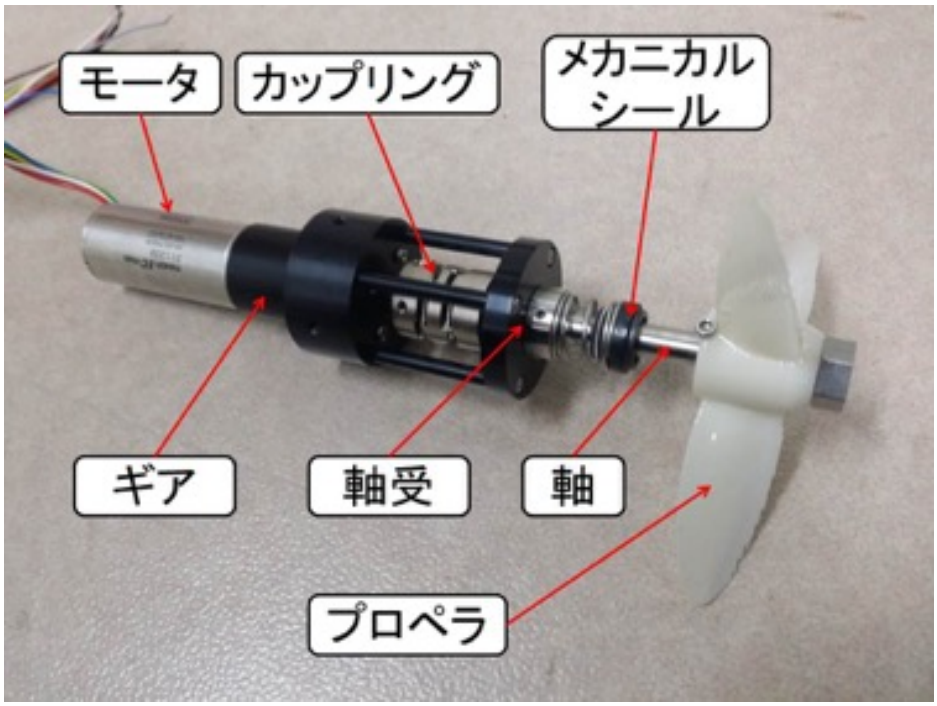

図 6　　主推進器内部機構（写真）

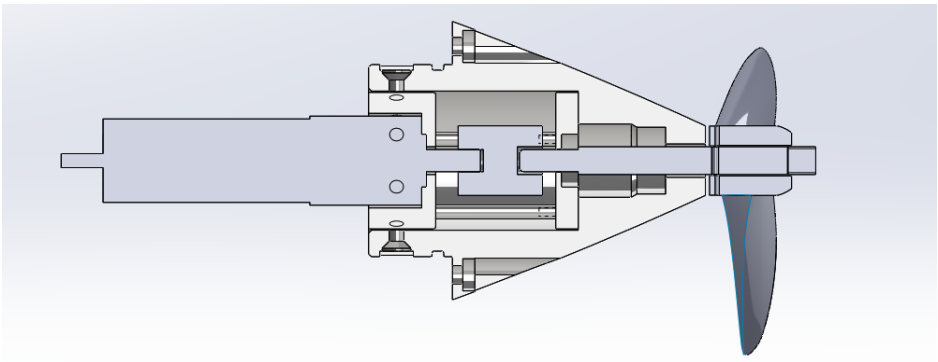

図 7　　主推進器内部機構（断面図）

2.1.2　ソフトウェア

AUV の制御ソフトウェアは各種機能をそれぞれ独立したスレッドとして構成し、メインスレッドで全てのスレッドを管理する。ソフトウェアの概要を図 8 に示す。各スレッド間で共用するデータは、セマフォを用いてデッドロックが起こらないように同期管理する。以下実装した機能を示す。

・Get_Ahrs

姿勢センサからシリアル通信で送られてくる情報を取得する。その情報から現在の X、Y、Z 軸の加速度と Z 軸の角速度を取得して、共有メモリに書き込む。

・Get_Depth

深度センサからシリアル通信で送られてくる情報を取得する。その情報から、現在の圧力を取得して共有メモリに書き込む。

・Get_DVL

ドップラ式速度計からシリアル通信で送られてくる情報を取得する。その情報から、現在のX、Y、Z 軸の対地速度を取得して共有メモリに書き込む。

・System

共有メモリから、X、Y、Z 軸の加速度、対地速度、Z 軸の角速度、圧力を取得する。また、その情報を処理することで、現在の姿勢、スタート地点からの位置変化、スタート地点からの針路変化、現在の深度情報を取得する。この情報をもとに、4 枚の舵の向き、スラスタの回転数を決定する。駆動部への駆動命令は、共有メモリへ指令値を書き込む。また、モータドライバからモータ異常の検出信号を常に受信する。モータに異常があった場合、緊急事態用の行動を行う。

・Rudder

共有データである舵向きデータを読み込んで、その向きに舵を回転させる。サーボモータへはシリアル通信により指令値を与える。サーボモータは数珠つなぎに接続することによって、一つの通信経路から 4 つ同時に制御することが出来る。

・Motor

共有メモリからモータの運動データを読み込み、モータ ON/OFF、回転方向、モータに送信する電流値を制御する。モータに送る電流値に応じてモータの回転数は変化する。モータへは電圧値によって指令値を与える。

・Acoustic Modem

水中音響通信装置を制御する。System スレッドから指令があった時に実行する。水中音響通信装置は、シリアル通信によって専用の回路にコマンドを送信することで使用が可能になる。

・Log

AUV の状態を記録する。各種センサ値、駆動部への指令値、カメラ、水中音響装置の使用時間を 1 秒間隔で記録する。

・Camera

カメラとライトを制御する。このスレッドは唯一運動制御用コンピュータ（KOLABOARD）ではなく画像用コンピュータ（Apalis T-30）で実行する。UDP 通信によって、System スレッドからカメラ撮影の指令が送信された時に実行する。カメラを起動してその時の状況を撮影する。それと同時に、水中ライトを点灯させる。画像用コンピュータに搭載された GPIO を使用して、水中ライトを ON/OFF させる。

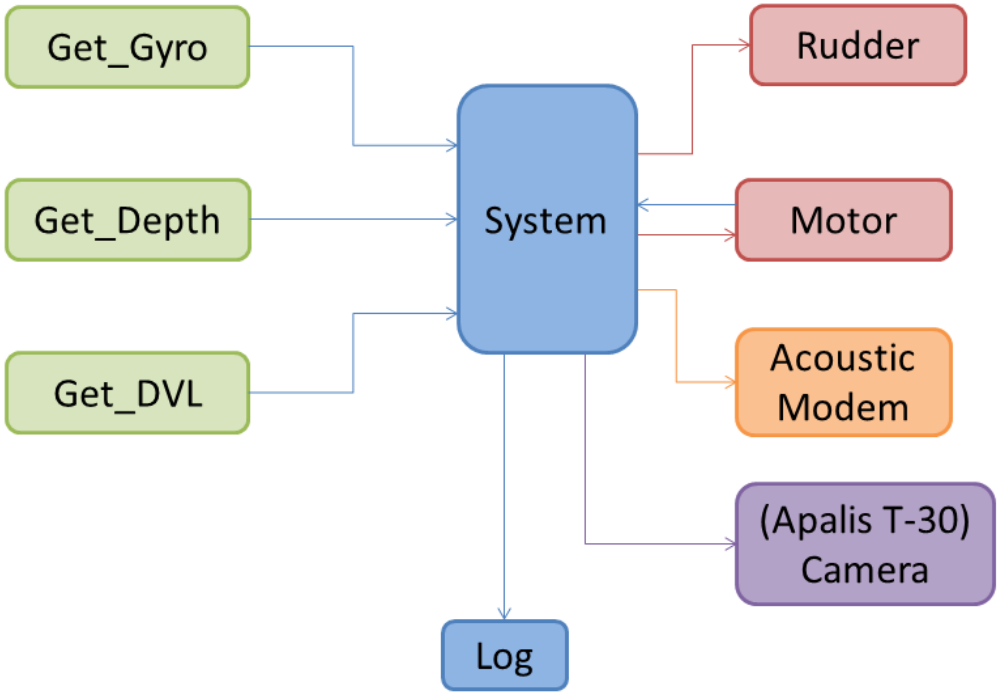

図 8　　ソフトウェア概要

2.1.3　後半の進捗状況

小型・航行型 AUV 開発後半では、上述のように、圧力容器をはじめ全ての機械部品の加工と圧力容器内部に搭載する機器と電気系統を製作して配線作業等を終了した。このほかの照明装置、カメラ部、駆動部分についても製作を終了し、各部の動作確認等を終えた。その後、全体の組み立て作業を実施して、その際に不具合が見出された箇所の設計を修正して再製作を行い、これらをほぼ完了した。ソフトウェアについて、基本的な部分を構築して動作試験までを完了した。今後、ミッションを統括するソフトウェアを組み込み、基本的な水槽試験、制御系を設計して組み込み、自律航行を可能にする予定である。

2.2　自律小型船開発

2.2.1　Wi-Fi 通信関連

現在の科学者のニーズから自律小型船のあるべき姿を考えると、基本的には勝手に動作しているが、調査等の現場における最終判断は人間が行うことが望ましい。これを実現するには自律小型船そのものを開発するとともに、自律小型船で取得したデータ、映像を速やかに科学者のいる場所まで送信する必要がある。映像を送信するためには自律小型船側から数 Mbps の回線速度が必要となるが、衛星通信では数百 Kbps 程度しかなく映像送信のためには不十分である。

そこで本研究では図 9 に本体形状、表 1 に仕様を示した日本無線（JRC）製の長距離 Wi-Fi アンテナを用いることを考えた。拠点側には図左のハイゲインパッチアンテナ（NZA-661）を設置し、自律小型船には図中央のコリニアアンテナ（NZA-657）を 2 つ設置する形で使用する。コリニアアンテナはオムニアンテナであり、2 つ設置することで、ダイバーシティ効果を得る。図 10 に示すように本システムを利用することで、36Mbps で最大通信距離 10km が可能である。このアンテナを利用した自律小型船の開発を行うとともに、船舶の動揺や海面反射の影響を受ける可能性のある洋上でも Wi-Fi を使用できるか検証を行った。

図 9　　Wi-Fi アンテナ一式

Table 1. Principal particulars Wi-Fi system

	NZA-661	NZA-657
Size	ϕ260×43mm	ϕ62.5x172mm
Gain	15dBi	15dBi
Directional angle	H:30° V:30°	H:omni-directional V:30°

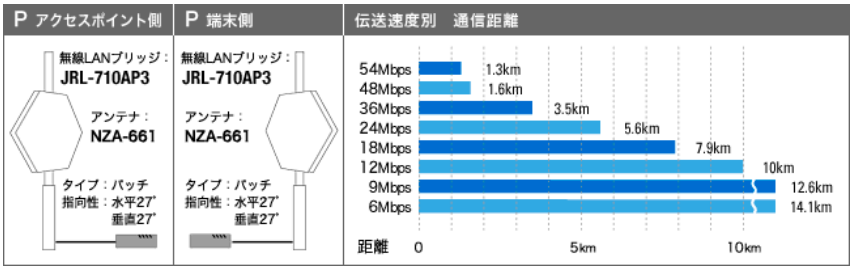

図 10　　Wi-Fi アンテナ性能

Wi-Fi 通信に用いるアンテナの特性上、長距離まで電波を送信するためにはアンテナの指向性の強い（送信できる範囲が狭い）ものが必要となる。そのままで使用すると通信可能エリアが狭くなってしまうため、通信可能エリアを広くするために図 11 に示すような構成で使用することとした。

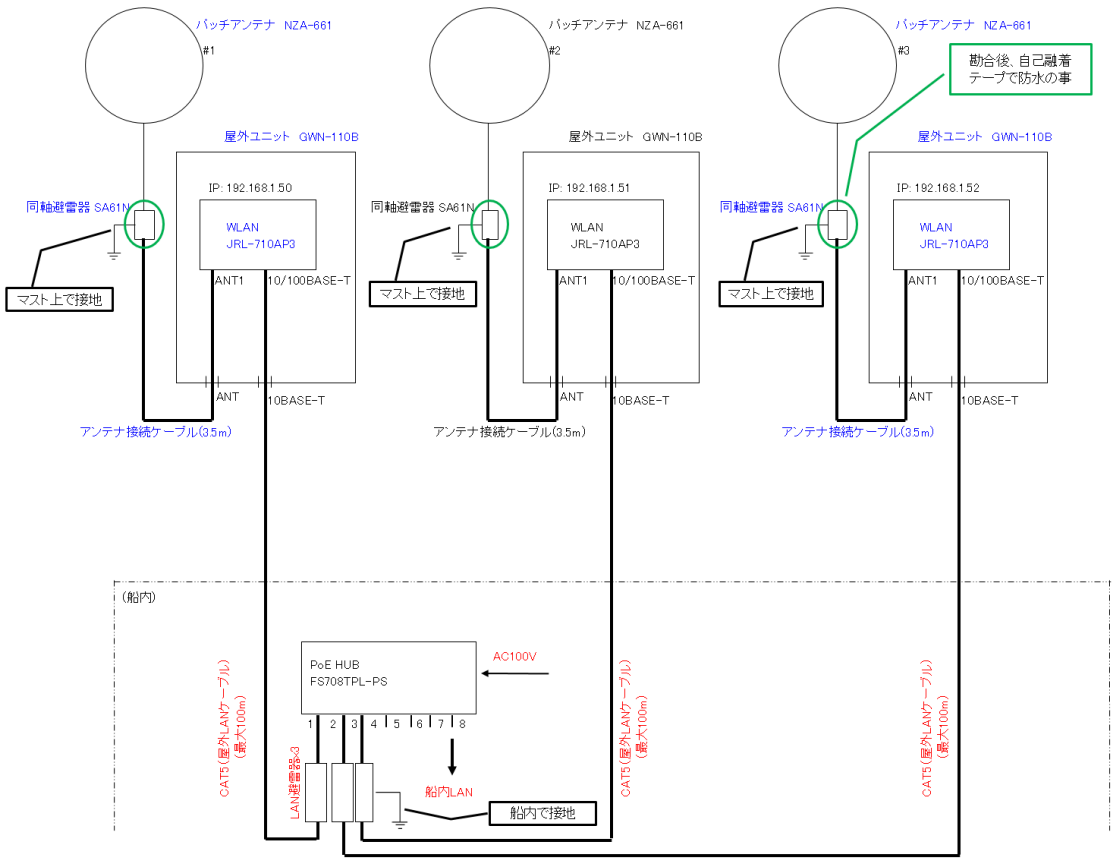

図 11　アンテナ構成例

このときのネットワーク構成図を図 12 に示す。図 12 に示すように陸上側と自律小型船との間に Wi-Fi による無線通信部分があるが、論理的には一つのネットワークとした。このような構成とすることによって、陸上、自律小型船と意識することなく、また特別な接続手続きを経

ることなく、IP アドレスを指定するだけで機器の情報を利用することが可能となる。

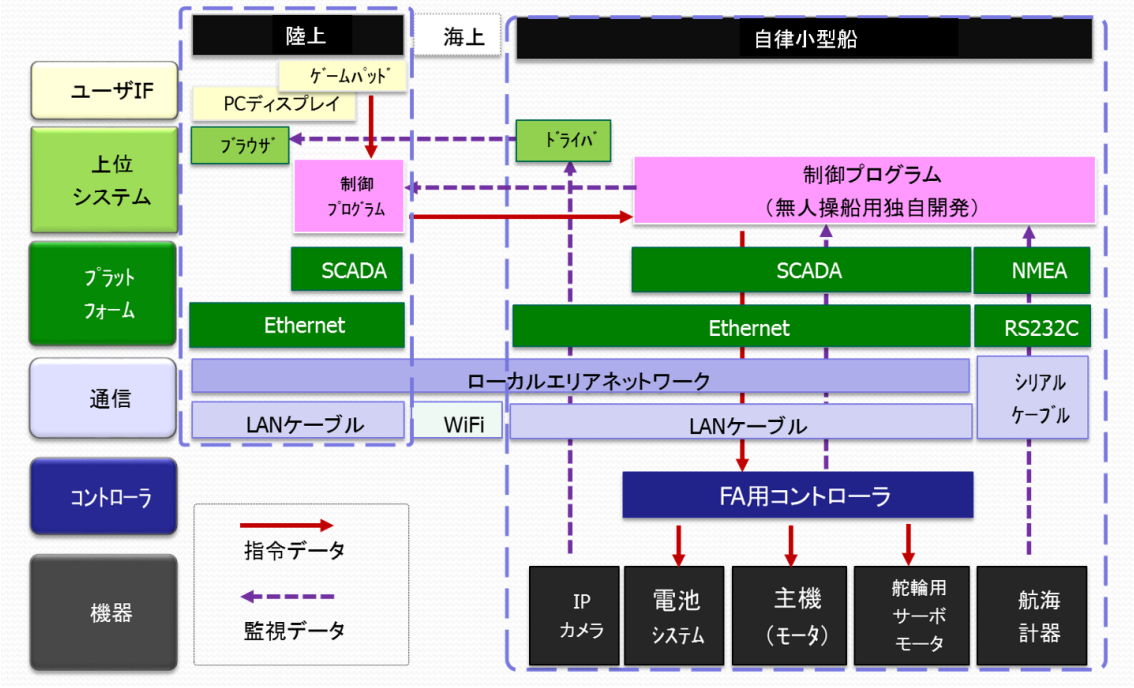

図 12　ネットワーク構成図

また無線通信を行う上で、電力損失をすることなく電波を到達させるにはフレネルゾーン内に遮蔽物があってはならないことが知られている。また、以下に示す式によって求められるフレネル半径の 60%以内に障害物がなければ自由空間相当であることも知られている。このため長距離の無線通信をするためには、アンテナの高さを十分に高くし、フレネルゾーンを確保する必要がある。図 13 にフレネルゾーンの概略図を示す。λは波長である。

$$r1 = \sqrt{\lambda\,(d1 * d2)/(d1 + d2)}$$

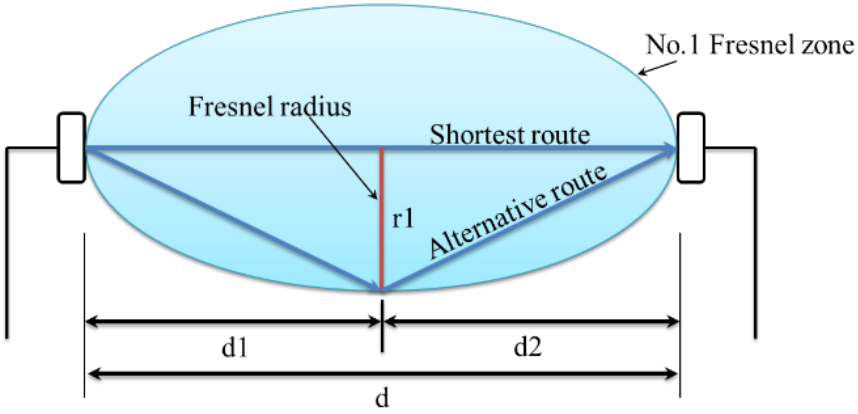

図 13　フレネルゾーン

洋上での Wi-Fi 通信実験は、図 14 に示す本学保有の実験船「らいちょうⅠ」および「らいちょうN」を用いて実施した。アンテナの高さはらいちょう N 側が約 5.7m、らいちょうⅠ側が約 3.5m であった。

図 14　「らいちょうⅠ」および「らいちょうN」

本実験のアンテナの高さで確保できるフレネルゾーンを用いて求め、その結果から通信可能距離を求めると約 1570m であった。通信速度を計測した結果が図 15 である。実験は東京港内（晴海沖）で実施した。図 15 中の赤線が理論通信可能距離を示している。図 15 を見てわかるように理論通信可能距離を越え、約 1700m 離れても 3Mbps 程度の通信速度が出ていることがわかる。このことから、本システムは海上で使用しても海面反射や船の動揺の影響を受けにくいことが明らかとなった。

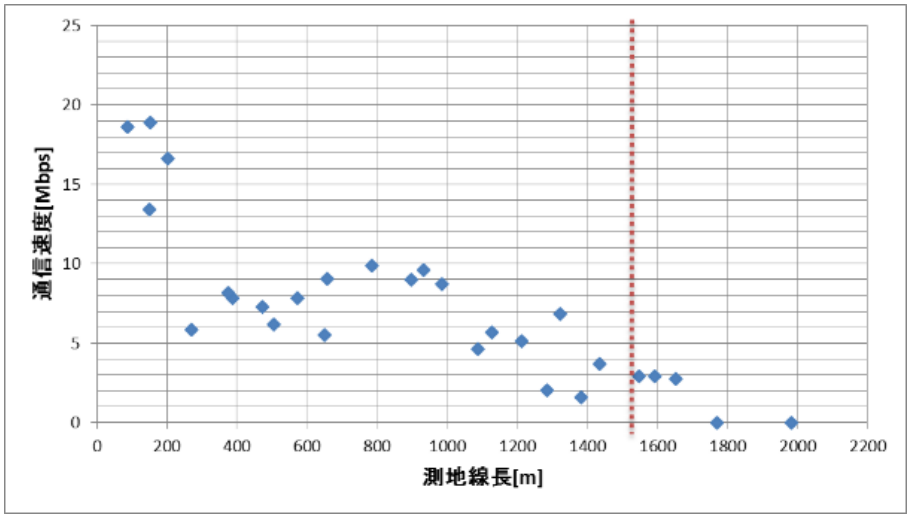

図 15　アンテナ間距離と通信速度の関係